

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KATI YAĞLAYICI VE AŞINDIRICI BİLEŞENLERİN FENOLİK REÇİNE ESASLI FREN  
BALATALARININ MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Adem Alper ADIGÜZEL**

**MAYIS 2015**

**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan :** .....

**Üye :** .....

**Üye :** .....



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Otomotiv fren sistemlerinde kullanılan sürtünme malzemeleri en karmaşık kompozit malzemeler olup, farklı çalışma şartları altında kararlı bir sürtünme katsayısı, yeterli mekanik mukavemet ve iyi aşınma direncine sahip olacak şekilde dizayn edilirler. Tüm bu özelliklere sahip bir balata üretilebilmesi için dört ana grup olarak; bağlayıcılar, takviye malzemeleri, dolgu maddeleri ve sürtünme ayarlayıcı malzemeler kullanılır. Sürtünme ayarlayıcı malzemeler, sürtünme katsayısını ve özgül aşınma miktarını düşüren katı yağlayıcılar ve sürtünme katsayısını ve özgül aşınma miktarını arttıran aşındırıcılar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Bu çalışmada farklı aşındırıcı ve katı yağlayıcıların otomobil fren balatalarının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında beni yönlendiren, çalışmaların sonuçlanması için yakından ilgilenen, fikir ve teşvikleriyle yardımını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deneysel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen K.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü asistanlarına ve hayatım boyunca hep yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Adem Alper ADIGÜZEL  
Trabzon 2015

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Katı Yağlayıcı ve Aşındırıcı Bileşenlerin Fenolik Reçine Esaslı Fren Balatalarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkileri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK ‘ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/ 04/ 2015

Adem Alper ADIGÜZEL

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Sürtünme Malzemeleri ve Balatalar .....	2
1.3. Asbestsiz Organik Balata Malzemelerinin Bileşenleri ve Etkileri .....	4
1.4. Balataların Sürtünme ve Aşınması .....	9
1.5. Balataların Sürtünme Performansını Etkileyen Faktörler .....	17
1.6. Balatalardan İstenen Özellikler .....	18
1.7. Disk ve Kampana Malzemeleri .....	19
1.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı .....	19
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
2.1. Kullanılan Malzemeler .....	25
2.2. Numune Üretimi.....	27
2.2.1. Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Üretimi.....	30
2.2.2. Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Üretimi .....	31
2.3. Numunelere Uygulanan Mekanik Testler .....	32
2.3.1. Sertlik Ölçümü.....	32
2.3.2. Çekme Dayanımı Ölçümü .....	32
2.3.3. Eğilme Dayanımı Ölçümü .....	32
2.3.4. Kesme Dayanımı Ölçümü .....	33
2.3.5. Darbe Dayanımı Ölçümü.....	34
2.4. Sürtünme ve Aşınma Test Cihazı ve Test Şartları.....	34
3. BULGULAR .....	36
3.1. Numunelerin Mekanik Özellikleri ile İlgili Bulgular .....	36

3.2.	Numunelerin Tribolojik Özellikleri ile İlgili Bulgular .....	37
3.2.1.	Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları ile İlgili Bulgular .....	37
3.2.1.1.	Disk Sıcaklığı ve Frenleme Sayısının Sürtünme Katsayısına Etkileri ile İlgili Bulgular .....	37
3.2.1.2.	Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Özgül Aşınma Miktarları ile İlgili Bulgular .....	46
3.2.1.3.	Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi.....	48
3.2.2.	Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları ile İlgili Bulgular .....	57
3.2.2.1.	Disk Sıcaklığı ve Frenleme Sayısının Sürtünme Katsayısına Etkisi .....	57
3.2.2.2.	Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Özgül Aşınma Miktarları ile İlgili Bulgular .....	63
3.2.2.3.	Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesi .....	63
4.	İRDELEME .....	70
5.	SONUÇLAR.....	77
6.	ÖNERİLER .....	79
7.	KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KATI YAĞLAYICI VE AŞINDIRICI BİLEŞENLERİN FENOLİK REÇİNE ESASLI  
FREN BALATALARININ MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Adem Alper ADIGÜZEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Danışman: Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK  
2015, 84 Sayfa

İki aşamadan oluşan bu çalışmanın birinci aşamasında katı yağlayıcı olarak grafit ve hegzagonal bor nitürürün (h-BN), aşındırıcı olarak da alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ve bor karbürün ( $B_4C$ ) fren balatalarının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerini belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Mekanik deneyler ilgili ASTM standartlarına uygun olarak oda sıcaklığında ve tribolojik deneyler Chase tipi sürtünme test düzeneğinde SAE J 661 standardına uygun olarak yapılmıştır. Numunelerin sürtünme katsayıları ve özgül aşınma miktarları katı yağlayıcı miktarının azalması ve aşındırıcı miktarının artması ile artmıştır. Numunelerin aşınmış yüzeylerindeki ve aşınma parçacıklarındaki demir miktarı da katı yağlayıcı miktarının azalması ve aşındırıcı miktarının artması ile artmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise aşındırıcı tane boyutunun fren balatalarının sürtünme ve aşınma davranışlarına etkileri incelenmiştir. Farklı tane boyutlarına sahip  $Al_2O_3$ , SiC ve  $B_4C$  kullanılarak üretilen numunelere yapılan testler sonucunda aşındırıcı tane boyutu arttıkça sürtünme katsayısının arttığı ve özgül aşınma miktarının azaldığı bulunmuştur. Aşınma direnci yüksek olan numunelerin aşınma parçacıkları genellikle plaka şeklinde olurken, aşınma direnci düşük olan numuneler ince taneli küresel aşınma parçacıkları sergilemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme, Aşınma, Fren Balatası, Katı yağlayıcı, Aşındırıcı, Aşındırıcı tane boyutu



Master Thesis

## SUMMARY

### EFFECTS OF SOLID LUBRICANTS AND ABRASIVES ON MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PHENOLIC RESIN BASED BRAKE PADS

Adem Alper ADIGÜZEL

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Bülent ÖZTÜRK  
2015, 84 Pages

The study consists of two stages. In the first stage, experiments were made to evaluate the effects of graphite and hexagonal boron nitride as solid lubricant and aluminum oxide and boron carbide as abrasives on mechanical and tribological properties of brake friction materials. Mechanical tests were done according to the related ASTM standarts at room temperature and tribological tests were performed on a Chase friction material testing machine according to the brake lining quality test procedure as per SAE J661. The friction coefficient and specific wear rate of the composites increased with decreasing solid lubricant and increasing abrasive content. The atomic fraction of Fe on the worn surfaces and wear debris of the composites increased with decreasing solid lubricant and increasing abrasive content.

In the second stage, the effects of abrasive particle size on friction and wear characteristics of automotive brake materials were studied. Different particle sizes of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC and  $\text{B}_4\text{C}$  were used as abrasive. The results showed that the friction coefficient of the composites increased and the specific wear rate decreased with increasing abrasive particle sizes. The friction materials showing high wear resistance exhibited a plate shape wear debris, while the materials showing low wear resistance produced fine spherical wear particles.

**Key Words:** Friction, Wear, Brake pad, Solid lubricant, Abrasive, Abrasive particle size

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Otomotiv fren sisteminin şematik görünümü .....	2
Şekil 2.	Otomotiv fren balatasında takviye elemanı etrafında oluşan temas platosunun görünümü .....	5
Şekil 3.	Tribolojik sistemin yapısı .....	10
Şekil 4.	Fren Balatası, temas platoları ve anlık gerçek temas alanlarının şematik gösterimi . .....	11
Şekil 5.	Balata ve disk arasındaki temasın şematik gösterimi .....	12
Şekil 6.	Birincil ve ikincil temas platolarının SEM görüntüleri.....	12
Şekil 7.	Balata yüzeyinde bulunan temas platolarının 1 m ve 1000 m kayma sonucunda ışık mikroskobu ile incelenmesi.....	13
Şekil 8.	Balata yüzeyinde mikro temasın oluşumu, büyümesi ve parçalanması.....	13
Şekil 9.	Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.....	16
Şekil 10.	Numune üretimi işlem akış diyagramı .....	28
Şekil 11.	Sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı testlerinin yapıldığı numunelerin üretim kalıbı şematik resmi.....	29
Şekil 12.	Mekanik testlerin yapıldığı numunelerin üretim kalıbı şematik resmi. ....	29
Şekil 13.	Kesme dayanımı ölçüm aparatının teknik resmi.....	33
Şekil 14.	Sürtünme test düzeneği (Chase tipi) .....	34
Şekil 15.	AB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi.....	39
Şekil 16.	AG grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi.....	39
Şekil 17.	BB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi.....	40
Şekil 18.	BG grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi.....	40
Şekil 19.	AB grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları. ....	41
Şekil 20.	AG grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları. ....	42
Şekil 21.	BB grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları. ....	42
Şekil 22.	BG grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları. ....	43
Şekil 23.	AB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimini.....	44
Şekil 24.	AG grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimini. ....	44
Şekil 25.	BB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimini.....	45
Şekil 26.	AB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimini.....	45
Şekil 27.	AB grubu numunelerin özgül aşınma miktarları. ....	46
Şekil 28.	AG grubu numunelerin özgül aşınma miktarları. ....	47

Şekil 29. BB grubu numunelerin özgül aşınma miktarları.....	47
Şekil 30. BG grubu numunelerin özgül aşınma miktarları. ....	48
Şekil 31. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) A0 b) B0 numunesi.....	49
Şekil 32. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) AB5, b) AG5, c) BB5, d) BG5 .....	51
Şekil 33. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) B10 b) G10 numunesi.....	52
Şekil 34. G0 numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri: a) 100x b) 300x .....	53
Şekil 35. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) A0 b) B0 numunesi. ....	55
Şekil 36. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) AB5 b) AG5 c) BB5 d) BG5 .....	55
Şekil 37. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) B10, b) G10.....	56
Şekil 38. A grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi. ....	59
Şekil 39. S grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi. ....	59
Şekil 40. B grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi.....	60
Şekil 41. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları. ....	60
Şekil 42. A grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi. ....	61
Şekil 43. S grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi. ....	62
Şekil 44. B grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi.....	62
Şekil 45. Numunelerin özgül aşınma miktarları.....	63
Şekil 46. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) A25 b) A63 .....	64
Şekil 47. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) S63, b) S90 .....	65
Şekil 48. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) B25 b) B90 c) B180.....	66
Şekil 49. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri a) A25, b) A63.....	67
Şekil 50. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri a) S63, b) S90 .....	68
Şekil 51. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri a) B25, b) B90, c) B180....	68
Şekil 52. h-BN ve grafitin kristal kafes yapıları, a) h-BN, b) grafit .....	72

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Çalışmanın 1. aşamasında üretilen numune bileşenleri ve hacimsel oranları.....	30
Tablo 2. Kullanılan aşındırıcıların özellikleri. ....	31
Tablo 3. Çalışmanın 2. Aşamasında üretilen numune bileşenleri ve hacimsel oranları.....	32
Tablo 4. Test şartları.....	35
Tablo 5. Numunelerin bazı mekanik özellik değerleri. ....	36
Tablo 6. Numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N) .....	54
Tablo 7. Numunelerin Aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu. ....	56
Tablo 8. Numunelerin aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N).....	57
Tablo 9. Numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N) .....	67
Tablo 10. Aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu .....	69
Tablo 11. Numunelerin aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N) .....	69

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Bir fren sisteminin ana fonksiyonu araç hızını yavaşlatmak, yokuş aşağı yollarda hızı sabit tutmak veya aracı tamamen durdurmaktır. Bunun için kinetik enerji, disk ve balata arasındaki sürtünme işi tarafından ısıya dönüştürülür. Fren sistemi aşınan malzeme (balata), karşı yüzey malzemesi rotor (disk veya kampana) ve balatayı hidrolik veya pnömatik olarak hareket ettirerek rotor yüzeyine bastıran sistemden oluşur (Şekil 1), [1]. Frenlemenin yüksek bir verimle yapılabilmesi için en önemli özellik disk-balata ara yüzeyinde minimum aşınmayı sağlayan yüksek ve kararlı sürtünme katsayısına sahip olmasıdır. Bu kriteri sağlayan en önemli faktörler ise balata malzemesinin kompozisyonu ve mikro yapısıdır.

Otomotiv fren sistemlerinde kullanılan sürtünme malzemeleri en karmaşık kompozit malzemeler olup genellikle ondan daha fazla bileşen içerirler. Otomotiv fren balataları farklı çalışma şartları altında kararlı bir sürtünme katsayısı, yeterli mekanik mukavemet ve iyi aşınma direncine sahip olacak şekilde dizayn edilirler [2].

Yaklaşık 25 yıl öncesine kadar, balata malzemesi olarak kullanılan asbest, frenleme için gerekli optimum koşulları sağlamasına rağmen frenleme esnasında oluşturduğu tozların havaya karışarak canlıların akciğerlerinde kanser oluşturması nedeniyle kullanımı yasaklanmıştır.

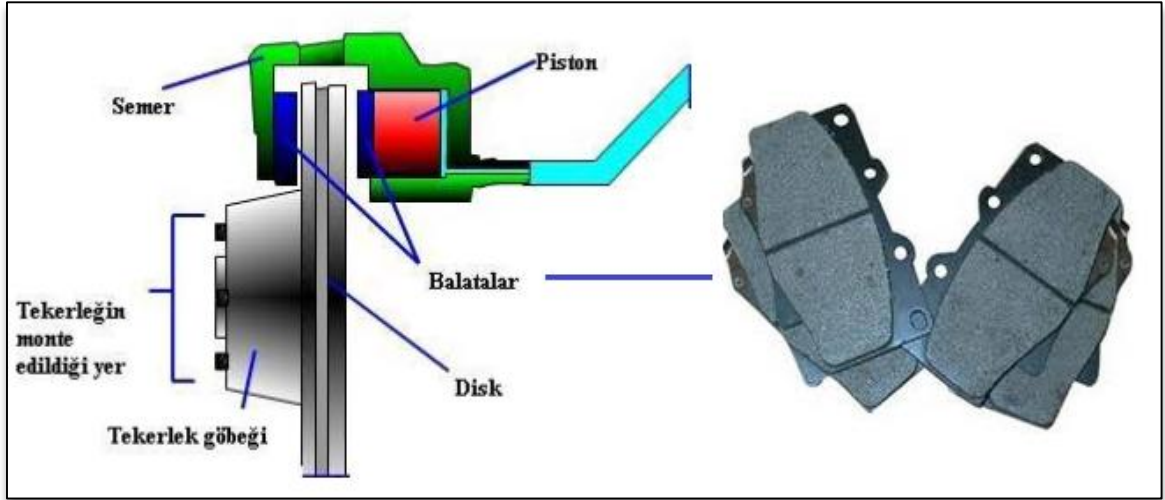
Gelişen teknoloji ile birlikte taşıtların hızı ve ağırlığı artarken, kullanılan fren sistemi boyutları tam tersine küçülmüştür. Dolayısıyla birim alana düşen enerji miktarı artmıştır ve oluşan ısı transferini gerçekleştirmesi için gerekli yüzey alanı küçülmüştür. Bu şartlar altında fren sisteminin güvenlik sınırları içinde ve gerekli konforu sağlayacak şekilde çalışabilmesi için en uygun balata kompozisyonunun seçilmesi gerekir [3].

Asbeste alternatif olarak geliştirilen ve sağlığa zararlı olmayan polimer esaslı kompozit fren balataları, farklı çalışma koşulları altında güvenlik sınırları içinde çalışabilmeleri, kararlı bir sürtünme katsayısına ve düşük aşınma oranına sahip olmaları nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen sürtünme malzemeleridir.

Kompozit fren balata malzemeleri çok ince tozlar halindeki metal veya metal dışı malzemelerin karıştırılması, istenilen formda preslenmesi ve kontrollü bir atmosfer altında belirlenen süre içerisinde sinterlenmesi ile üretilmektedir. Fren balatası üretiminde bu yöntemin tercih edilmesinin temel nedeni farklı özelliklere sahip karışım malzemelerinin özelliklerini yitirmeden üretiminin gerçekleştirilebilmesidir.

İstenen özelliklerde sürtünme malzemesi elde etmek için çok sayıda farklı malzeme birlikte kullanılmaktadır. Günümüzde 2000'den fazla farklı malzemenin değişik orandaki karışımları otomotiv sektöründe sürtünme malzemesi üretiminde kullanılmaktadır [4].

Bu çalışmada, farklı aşındırıcı ve yağlayıcı içeren numunelerin mekanik ve tribolojik davranışları incelenerek yukarıda ifade edilen özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 1. Otomotiv fren sisteminin şematik görünümü [5].

## 1.2. Sürtünme Malzemeleri ve Balatalar

Sürtünme malzemeleri, sürtünme hareketini iletmek, araçları yavaşlatmak veya tamamen durdurmak için kullanılmaktadırlar. Sürtünme malzemelerinin işlevlerini tam olarak yerine getirebilmesi için yüksek sürtünme katsayısının yanı sıra dinamik yükler altında ve yüksek sıcaklıklarda da sabit bir sürtünme katsayısı değerini muhafaza etmesi gerekmektedir. Ayrıca sürtünme malzemelerinin aşınma miktarının az olması, karşı

malzemeye zarar vermemesi, yeterli mekanik mukavemete sahip olması, gürültü yapmaması ve çevreye zarar vermemesi istenmektedir [6].

Balata malzemeleri genel olarak 3 ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar kullanılan bağlayıcı malzemeye göre metalik, organik ve karbon esaslı kompozit malzemelerdir. Metalik fren balataları genellikle bakır veya demir esaslıdır ve aşırı derecede ısı kararlılık isteyen uygulamalarda kullanılır. Performansı arttırmak için inorganik katkı maddeleri veya seramiklerle birlikte katı faz sinterlenmesi yöntemiyle üretilirler. İmalatları kolay ve ucuzdur. Yoğunluklarının yüksek olması da fren sistemini diğerlerine göre daha verimli yapar [1].

Karbon esaslı sürtünme malzemeleri ağırlığın kritik olduğu, yüksek performansın istendiği ve maliyetin ikinci derecede olduğu uygulamalarda tercih edilir. Hafifliği, ısı kararlılığı ve yüksek sıcaklık dayanımı ile fren malzemesi olarak mükemmel performans gösterirler [1].

Organik polimer esaslı fren balataları, asbest esaslı organik balatalar (AEOB), asbest dışı organik balatalar (ADOB) ve yarı metalik veya reçine bağlı metalik balatalar olmak üzere üç alt gruba ayrılmaktadır.

AEOB, 1900'lü yıllardan sonra kullanılmaya başlanmıştır. Asbest elyaf, sürtünme malzemesine mükemmel ısı kararlılık, yüksek sürtünme katsayısı, mükemmel takviye edici özellik, iyi aşınma direnci, düşük Mohs sertliği ve düşük maliyet sağlamıştır. Ancak asbest 650 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda kristal suyunun % 90'ını ve çekme mukavemetinin % 70'ini kaybeder. Sertliği artan sıcaklıkta azalır ve sağlığa zararlıdır [7].

Uluslararası sağlık örgütlerinin girişimleri ile son 10 yılda ulusal ve uluslararası mahkemelerce asbest kullanımı yasaklanmıştır. Bu nedenle asbestin özelliklerini karşılayacak asbeste alternatif malzeme araştırmaları hız kazanmıştır [8].

Asbestsiz balatalar, çoğu farklı elyaf ve elyaf olmayan malzemelerin karışımından oluşur. Balata malzemesinin karakterini belirleyen en önemli bileşen elyaf olup en yaygın kullanılanları cam (kırılmış, mineral ve muhtelif ticari markalılar), metal (genellikle çelik), seramik, mineral, aramid (Kevlar), selülozik ve diğer organik elyaflardır [1].

Yarı metalik balatalar, organik ve sinterlenmiş metalik sürtünme malzemeleri arasında yer almaktadır. Bu tip balatalar kararlı sürtünme katsayısı (düşük sıcaklıklarda 0,35- 0,45 ve yüksek sıcaklıklarda 0,30– 0,35), düşük aşınma, karşı yüzeyle mükemmel uyum, yüksek enerji absorbe etme yeteneği, yüksek sıcaklıklara dayanma kabiliyeti ve

sessiz çalışma özellikleri sergilerler. Yarı metalik balatalar otomobil disk fren balatalarında diğerlerine göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır [1,9].

### 1.3. Asbestsiz Organik Fren Balata Malzemelerinin Bileşenleri

Fren sisteminin sürtünme ve performansı balata yapısına bağlı olarak değişir. Fren performansı balata malzemesinin kompozisyonu ve mikro yapısı tarafından kontrol edilmektedir. İstenen özelliklerde bir balata üretilebilmesi için dört ana grup olarak; bağlayıcılar, takviye malzemeleri, dolgu maddeleri ve sürtünme ayarlayıcılar kullanılır [1,7,10].

#### i) Bağlayıcı Maddeler:

Bağlayıcılar, tüm bileşenleri bir arada tutmak ve termal açıdan kararlı bir matris oluşturmak amacıyla kullanılır. Balata bileşiminin sürtünme özelliklerine katkıda bulunurlar. Bağlayıcı madde hacimsel veya maliyet bakımından kompozit malzemenin önemli bir bileşeni olmamakla birlikte balatanın bütünlüğünü sağlayan en önemli bileşendir [9]. Bağlayıcı reçine, günümüz modern asbestsiz sürtünme malzemelerinin başlıca organik kısmını oluşturur [10]. Bağlayıcı olarak farklı birçok termoset reçineyi kullanmak mümkündür. Fakat bunlar arasında fenolformaldehit reçinesi, otomotiv sektöründe kullanılan en yaygın bağlayıcıdır [11]. Ticari uygulamalarda fenolik reçinelere viskoziteyi arttırarak sertleşmeyi hızlandırmak ve bağlar arasındaki rijitliği arttırmak amacıyla hekzametilen tetramin (kısaca hekza  $C_6H_{12}N_6$ ) katılmaktadır. Sürtünme malzemeleri için %10 hekza içeriği idealdir [1].

Polimerizasyonun tamamlanarak reçinenin sertleşmesine kürleşme denir. Kürleşme termoset bir reçinenin özelliklerinin geri dönülmez bir şekilde kimyasal bir reaksiyonla değişmesidir [12].

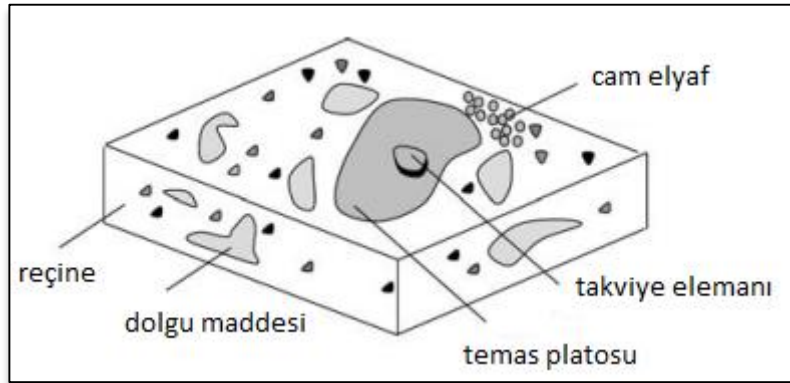
Fenolik reçinelerin kürleşme şartları 232 °C'ye kadar sıcaklıklarda birkaç dakikadan birkaç saate kadar olabilir. Yüksek sıcaklık dayanımının elde edilebilmesi için fenolik reçinenin kalıpta başlayan kürleşmesinin tamamlanması gerekmektedir. Bunun için kalıplanmış parçalar 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hacmine bağlı olarak belli bir süre fırında tutularak kürleşmenin tamamlanması sağlanır [13]. Son kürleme işlemi ısı işlemi olarak da adlandırılır ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanır [14].



ii) Takviye Elemanları:

Yapısal malzemeler, öncelikle sürtünme malzemesi içindeki diğer bileşenleri kuvvetlendirmek için kullanılır. Balatada mekanik mukavemet, sertlik, termal kararlılık, aşınma direnci ve kararlı bir sürtünme sağlarlar [15]. Son zamanlarda yapılan araştırmalar, sürtünme malzemelerindeki frenleme yükünün temas platoları tarafından taşındığını göstermektedir. Bu platolar diğer sıkışmış yumuşak bileşenlerin takviye fiberi etrafında birikmesi ile oluşur. Şekil 2’ de görüldüğü gibi aşınma parçacıkları takviye elyafları gibi birincil bir destek olmadan bir arada tutunamazlar [16].

Balatalarda takviye malzemesi olarak önceleri asbest elyaf kullanılmaktaydı. Asbestin sağlığa zararlı olması ve kullanımının yasaklanması nedeniyle asbestin tüm üstün özelliklerine sahip olan fakat sağlık riski taşımayan alternatif elyaflar araştırılmaya başlanmıştır [9]. Bugüne kadar sürtünme malzemelerinde kullanılan sentetik veya doğal elyafların hiçbirisi tek başına sürtünme performansı, ısıl kararlılık ve düşük maliyet yönünden asbest elyafın yerini alamamıştır. Takviye elyafı olarak genellikle cam elyafı, taş yünü elyafı, çelik yünü, karbon, aramid lifler (keklar), basarit ve sepiyolit kullanılmaktadır. Metal takviye malzemesi olarak ise bakır, çelik, demir, pirinç, bronz ve alüminyum gibi malzemeler sürtünme malzemelerinde kullanılmaktadır [15].



Şekil 2. Otomotiv fren balatasında takviye elemanı etrafında oluşan temas platosunun görünümü [16].

Cam Elyaf (E- camı elyafı): E-camı çok az alkali içeren borosilikat camıdır. Çekme dayanımı, basma dayanımı ve tokluğu yüksek, elektriksel özellikleri iyi, maliyeti düşüktür. Fakat darbe direnci nispeten kötüdür. E-camı yüksek sıcaklıklarda uzun süreli ısıtmadan sonra bir miktar kristalleşme göstermesine rağmen genellikle amorf yapıdadır. Günümüzde

E-camı genellikle doğrudan ergitme yöntemi ile üretilir. Doğrudan ergitme yönteminde eritilmiş E-camı çok sayıda hassas boyutlu delikleri olan platin alaşımından yapılan kovanlardan geçirilerek çekilir. Tüm cam elyaf, üretim sırasında bağlayıcı ile kaplanır. Bağlayıcı genellikle bir organik silikon bileşiği veya silandır. Bu bağlayıcı, hem cam elyafın kullanım özelliğini belirler hem de liflerin birbirine sürterek aşınmasını engeller. E-camı polimer matrisli kompozitlerde yaygın takviye edici olarak kullanılır [17].

**Taş Yünü Elyaf:** Hammaddesi doğal volkanik kayadır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı mineral elyafıdır. Daha çok ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılır. Özellikleri itibariyle Basarit elyafa benzemektedir. Farklı çap ve boyutlarda üretilir [18].

**Çelik Yünü Elyaf:** Uygun takviye etme özelliği, iyi ısı ve sürtünme kararlılığı, ekonomik oluşu ve karıştırma esnasında parçalanmaya karşı direnci sayesinde en çok kabul gören alternatif malzemelerden biridir. Korozyon dezavantajına rağmen yumuşak çelik elyaf daha kolay işlenebilir ve ucuz olması sayesinde tercih edilmektedir. Uzun elyaflar daha iyi takviye sağlarken kısa elyaflar kalıplamada kolaylık sağlarlar. Uzun elyaflar ticari araçlarda disk balata uygulamalarında başarı ile kullanılmaktadır [19]. Çelik elyaflar diskin aşırı aşınmasına ve disk kalınlığının değişmesine neden olabilir. Bunun sonucunda titreşim ve gürültülü çalışma durumu ortaya çıkar. Çelik elyaflar yüksek sertliğe sahip olması ve çelik ile dökme demir disk arasındaki metalik adhezyon nedeniyle karşı yüzeyi fazla aşındırır [20].

**Aramid Elyaf:** Kevlar, ticari olarak mevcut olan en mukavim ve rijit organik elyafıdır. Kevlar, tescilli marka olup para aramid elyaflara Du-Pont firmasının verdiği ticari isimdir. Yüksek mukavemete sahip olduğundan balatalarda takviye elemanı olarak kullanılır. Aramid elyaf yüksek tokluğu nedeniyle karıştırma prosesinde dirençli olduğu için balata üretiminde tercih edilir. Termomekanik stabilitesi iyi olduğundan yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Statik sürtünme özelliklerine sahip olduğundan sürtünme davranışını iyileştirir. Korozyon direnci yüksektir ve karşı malzemeyi kısa sürede aşındırmamaktadır. Nem ve sıcaklık değişimlerinden boyutsal olarak etkilenmemektedir. Düşük yoğunluğu balataların hafif olmasını sağlar. Kevlar, bu üstün özellikleri nedeniyle sürtünme ve otomotiv endüstrisinde asbeste alternatif bir elyaf olarak kabul edilmiştir. Kevlar fiberler uzun yani sürekli elyaf ip şeklinde üretilir. Çeşitli uzunluklarda kesilerek doğranmış elyaf oluşturulur. 0,5– 8 mm arasındaki elyaflar ve elyaflara bağlı birçok ince elyafçıklardan oluşan bir şekli de pulp olarak adlandırılır [13,21].

Basarid® Elyaf: Volkanik orijinli bazalt taşı, Basarid® (tescilli marka) elyafı üretiminde kullanılan hammaddedir. Deutsche Basaltsteinwolle GmbH firmasının kullandığı ticari addır. Bazalt taşı 1400 °C'de ergitilerek elyaf üretilir. Sürekli Basarid® elyafı yüksek mukavemete sahip, tok, korozyona dayanıklı, ısı ve ses izolasyonuna uygundur. Çevreye zararlı olan asbestin kullanıldığı alanların hemen hemen hepsinde kullanılabilir [22].

### iii) Dolgu Maddeleri:

Dolgu maddeleri istenen sürtünme özelliklerini bozmadan balatayı geliştirmek, hacim doldurmak ve maliyeti düşürmek amacıyla kullanılır. İşletme şartlarında balatalarda meydana gelebilecek yüzeyden kopmalar, oluşan ısının homojen bir şekilde dağılması ve sürtünme katsayısının ayarlanması, mukavemetin ve korozyon direncinin artırılması ve balatanın renklendirilmesi dolgu maddelerinin yardımıyla yapılmaktadır [13].

Genellikle sürtünmeye etkisiz kabul edilir fakat sürtünme ayarlayıcı bir madde de olabilirler. Dolgu maddesi olarak alçı, barit, kil, kalsiyum karbonat ve vermikülit gibi genellikle düşük fiyatlı mineraller kullanılmaktadır. İdeal bir dolgu maddesi takviye edici özellikte olmalıdır, su ve diğer sıvılardan etkilenmemelidir, kararlı olmalıdır yani polimer stabilitesini bozmamalıdır. Polimerlerle temas eden kimyasal maddelerin, ışığın ve ısının etkisiyle çözünmemeli, balatanın mekanik özellikleri iyileştirmelidir. Abrasif aşınma direncini ve alevlenmeye karşı direnci artırmalı, en önemlisi de maliyeti düşürmelidir [13].

Barit: Baryum elementinin en yaygın minerali olan baryum sülfat ( $BaSO_4$ ) yaygın bir dolgu maddesidir ve genellikle sürtünme katsayısına etkisiz kabul edilmektedir [9]. Metalik olmayan mineraller arasında en yüksek yoğunluğa sahip malzemedir. Yüksek yoğunluğu, az aşındırıcı olması, yüksek basınç ve ısı altında kimyasal kararlılığını koruması, su ve asitlerde düşük çözünürlüğü, manyetik özelliğinin olmaması, ucuz ve kolay temin edilebilir olması sürtünme malzemesi üretiminde yaygın şekilde kullanımını sağlamıştır. Diğer birçok mineralden farklı olarak ısıtıldığı zaman suyunu ve karbon dioksitini kaybetmemesi sürtünme elemanları için çok önemlidir [23].

Kalsiyum Karbonat ( $CaCO_3$ ): Barite alternatif olarak kullanılır. Daha ucuzdur, ancak yüksek sıcaklıklara dayanımı daha düşüktür [16].

Vermikülit: Mikanın doğal aşınmasıyla oluşan bir mineraldir. Vermikülit özellikle ısı kararlılığı, hafifliği ve çevreye zararlı olmaması nedeniyle sürtünme malzemelerinde tercih edilir. Vermikülit balatanın eğilme dayanımı ve feyd dayanımı artırır. Boşluklu yapısı sayesinde ısı genleşme özelliğini artırır ve aynı zamanda mükemmel ses yalıtımı

sağlar. Frenleme sesini azaltması ve balata yoğunluğunu düşürmesi nedeniyle tercih edilir [24].

iv) Sürtünme Düzenleyici Katkılar:

Sürtünme düzenleyici katkılar hem sürtünme katsayısı artırmak hem de özgül aşınma miktarını düşürmek için sürtünme malzemelerine katılırlar. Sürtünme katsayısını ve özgül aşınma miktarını düşüren yağlayıcılar ve sürtünme katsayısını ve özgül aşınma miktarını arttıran aşındırıcılar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar [16].

**Yağlayıcılar:** Katı yağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını stabilize etme, aşınma miktarını kontrol etme, gürültüyü azaltma ve titreşimi sönmülme amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle grafit ve çeşitli metal sülfidler katı yağlayıcı olarak kullanılır [16].

**Grafit:** Karbonun çok yapıları şekillerinden biri olup tabakalı bir yapıya sahiptir. Mohs sertliği 1-2, yoğunluğu  $2,1 \text{ g/cm}^3$  dür. Hegzagonal düzendeki karbon atomları güçlü kovalent bağıyla bağlıdır. Tabakalar kendi aralarında zayıf ikincil bağlarla bağlı olduğundan birbirleri üzerinde kolayca kayar. Tabakaların kayma kolaylığı, grafitte yağlayıcılık özelliği verir. Bu özelliğiyle grafit balatalarda sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılır. Grafitin sürtünme katsayısı 0,10–0,15 civarındadır. Yüksek sıcaklık ve ısıl şok dayanımı, iyi ısı iletkenliği ve korozyon direnci nedeniyle sürtünme malzemelerinde yağlayıcı olarak kullanılmaktadır [25].

**Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN):** Borik asitten ve/veya bor karbürden yüksek sıcaklıkta sentezlenerek üretilmektedir. Yoğunluğu:  $2,3 \text{ g/cm}^3$  olan hegzagonal bor nitrür yaklaşık  $2450 \text{ }^\circ\text{C}$  de ergir, kimyasal ataklara karşı dirençli yumuşak bir malzemedir.

Hegzagonal bor nitrür günümüzde beyaz grafit adı ile anılmaktadır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı oksidasyon direnci yüksek bir malzemedir. Toz olarak üretilen hegzagonal bor nitrür yüksek sıcaklıkta yağlama malzemesi olarak çok geniş kullanım alanına sahiptir [13].

**Aşındırıcılar:** Aşındırıcılar yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı sağlamak için kullanılırlar. Aşındırıcı malzeme, sürtünme malzemesinin sürtünme katsayısı arttırdığı gibi karşı yüzeyin de aşınma miktarını artırır. Aşındırıcılar sürtünme yüzeyinde frenleme esnasında meydana gelen istenmeyen sürtünme filmi ve demir oksit bileşenlerini ortadan kaldırır. Aşındırıcılar 7-9 Mohs sertlik değerine sahip malzemelerdir. Genellikle zirkonyum oksit, zirkonyum silikat, alüminyum oksit, silisyum karbür ve bor karbür gibi malzemeler sürtünme malzemelerinde aşındırıcı olarak kullanılırlar [16].

Alüminyum Oksit ( $Al_2O_3$ ): Kristalografik olarak, oksijen iyonlarının alüminyum iyonları tarafından sıkı hegzagonal olarak sarılması ile meydana gelmiştir. Dış görünüş olarak beyaz bir tozudur. Alüminyum oksitin ergime noktası  $2050^{\circ}C$ 'dir. Kaynama noktası ise  $2080^{\circ}C$ 'dir. Alüminyum oksitin yoğunluğu  $3,95 \text{ gr/cm}^3$ , Mohs sertliği 9, ergime ısı  $5100-6000 \text{ cal/gr.mol}$ , buharlaşma ısı  $11790 \text{ cal/gr.mol}$  olarak belirlenmiştir [4].

Silisyum Karbür ( $SiC$ ): Oldukça sert, keskin ve agresif bir aşındırıcıdır. Silisyum karbür, alüminyum oksitten daha sert ve kimyasal olarak daha kararlı bir malzemedir. Yüksek saflıktaki (yeşil renk) silisyum karbür, mühendislik seramiklerinde sinter amaçlı kullanılmaktadır. Saflığın % 97.5 veya daha düşük olması durumunda ise abrasif ve refrakter amaçlı olarak kullanılırlar. Saflığın % 90'ın altına düşmesi durumunda ise, metalürjik uygulamalarda kullanılırlar. Yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek termal iletkenliği nedeniyle uzay teknolojisinde ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Son zamanlarda karbon elyaf takviyeli seramik fren disklerinde  $SiC$  kullanıldığı da bilinmektedir. Böylece  $SiC$ 'ün yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımından yararlanır [26].

Bor Karbür ( $B_4C$ ):  $SiC$ ,  $Si_3N_4$ , elmas,  $Al_2O_3$  gibi önemli sert ametal grubunda oksit olmayan bir malzemedir. Kimyasallara karşı yüksek kararlılığı, iyi mukavemet özellikleri, nötron emme kabiliyeti, düşük yoğunluğu gibi birçok üstün özelliğiyle zırh uygulamaları, nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu, kesici ve delici uçlar, aşındırıcılar gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrür ( $cBN$ )'den sonra en sert üçüncü malzemedir [27].

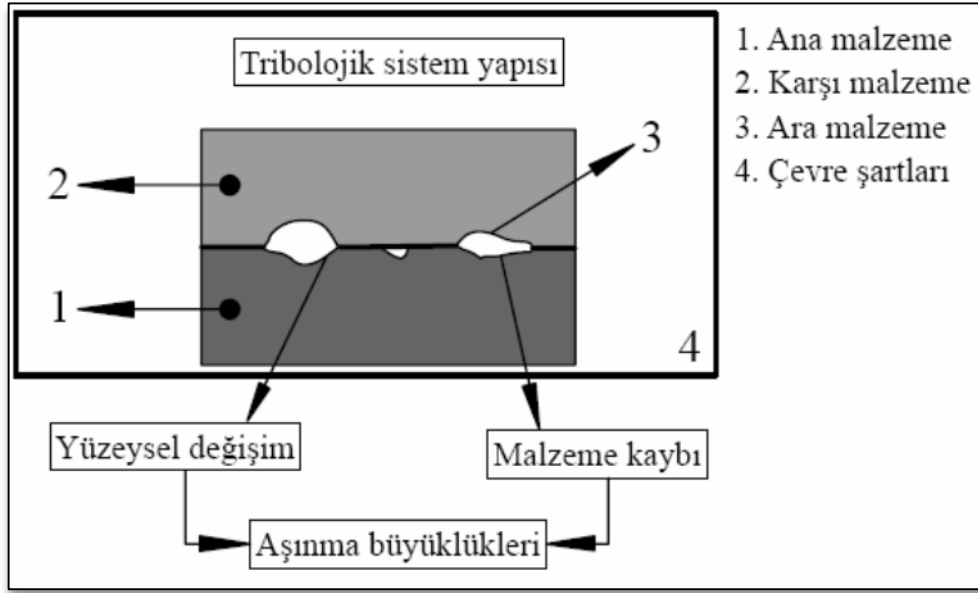
#### 1.4. Balataların Sürtünme ve Aşınması

Sürtünme; birbiri üzerinde kayan yüzeylerin harekete karşı gösterdikleri direnç olarak adlandırılır. Adhesif teoriye göre sürtünme yüzey pürüzlülüklerinin deformasyonu ve kesmenin bir sonucu olarak oluşur. Sürtünme statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılır. Statik sürtünme kaymayı başlatmak için gereken kuvveti, dinamik sürtünme ise kayma hareketinin devamını sağlamak için gereken kuvveti ifade etmektedir [13,25,28].

Yüzeyler arasında meydana gelen sürtünme kuvveti, cisme etki eden normal kuvvet ( $N$ ) ve yüzeyin sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) ile doğru orantılıdır ( $F = \mu.N$ ). Katılar çok iyi parlatılmış olsalar dahi her zaman bir yüzey pürüzlülüğü ( $\cong 0,1\text{mm}$ ) sahiptir. İki katı arasında meydana gelen temas, bu mikro pürüzlülükler üzerinden gerçekleşmektedir. Coulomb (1785) ve Amontons'un (1699) geliştirdikleri bu yasalar birbiri üzerinde kayan

metaller için doğrudur, ancak plastiklerde artan yükte meydana gelen deformasyonlar sebebiyle sürtünme katsayısı sürekli değişir [28].

İlgili yüzeyler arasındaki sürtünme belirli değerler içinde olmalıdır. Taşıt frenlerinde sürtünmenin az olması taşıtın istenilen mesafe ve zamanda duramamasına, sürtünmenin fazla olması ise taşıtın frenlerinin bloke olmasına neden olabilir. Frenlerde olduğu gibi, sürtünmeyi maksimum düzeye çıkarmak için yapılan çalışmaların yanında, sürtünmeyi minimum düzeye indirmek ya da tercihen tamamen yok etmek için yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak her iki teknik sistemde de sürtünme ve aşınma olayları meydana geldiğinden tribosistem olarak tanımlanırlar. Bir tribolojik sistem temel sürtünme elemanı (ana malzeme), karşı sürtünme elemanı (karşı malzeme), yağlama elemanı (ara malzeme) ve çevre gibi unsurlardan meydana gelir (Şekil 3), [29].



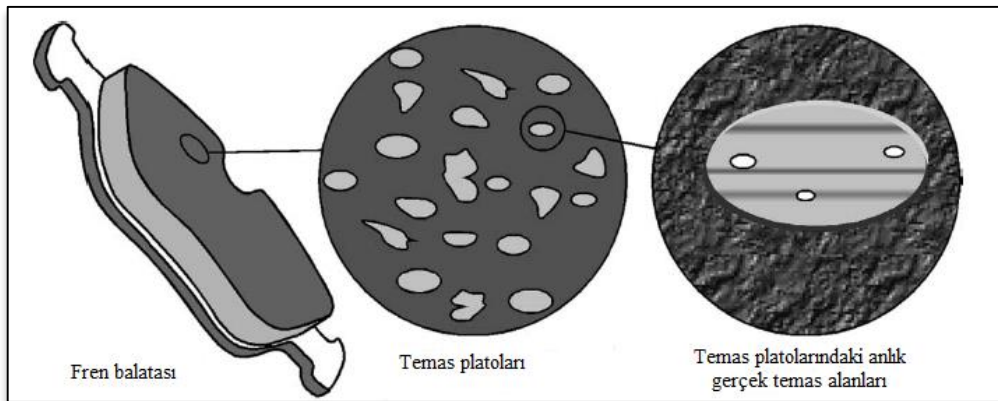
Şekil 3. Tribolojik sistemin yapısı [29].

Fren sistemlerinde temel eleman, sistemin fonksiyonu açısından en fazla aşınma tehlikesi gösteren balatadır. Karşı sürtünme elemanı diskli sistemlerde disk, kampanalı sistemlerde pabuçtur. Her iki eleman arasında frenleme esnasında meydana gelen sürtünme ve aşınma sonucunda bir sürtünme filmi meydana gelir. Bu film genellikle disk yüzeyinde yağlayıcı gibi bir koruma görevine sahiptir. Balatanın aşındırıcı etkilerine karşı diski korur ve sürtünme olayının gelişiminde çok önemli bir yere sahiptir. Frenleme esnasında çevre

şartları da önemlidir. Toz, kir, su, hava koşulları gibi etkenler tribolojik teması ve dolayısıyla frenleme performansını etkiler [28].

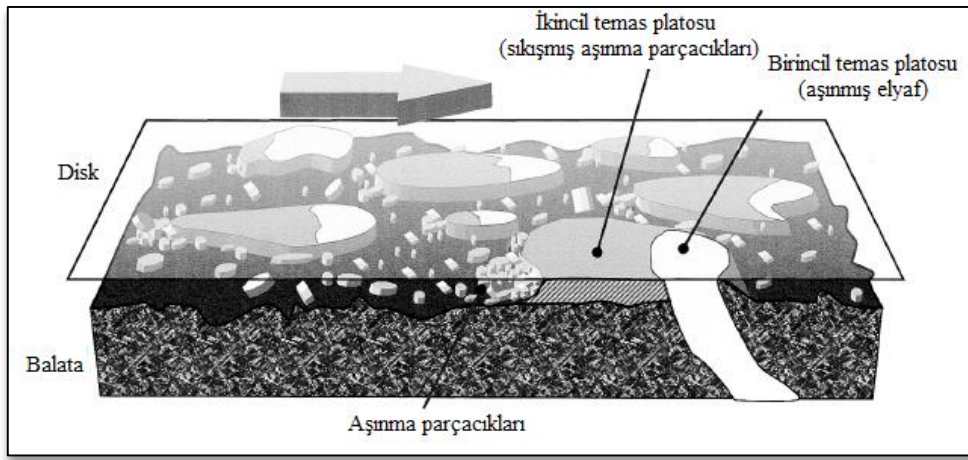
Dökme demir bir fren diski ile organik veya yarı-metalik bir fren balatası arasındaki etkileşim bu malzeme çifti için özeldir. Bu sistemdeki kuru temas çoğunlukla yüksek hız, yüksek temas basıncı ve balata malzemesinin etkisiyle çok çeşitli ve karmaşıktır. Özellikle kayma esnasında iki sürtünme yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme tabakası, tribolojik temasın yapısını belirlemektedir. Balata ve disk arasında meydana gelen tribolojik temasın yapısı sürtünme, aşınma, gürültü ve titreşim gibi özelliklerin belirlenmesinde çok önemli etkindir [28].

Balatalar çok farklı özellik ve türdeki bileşenlerden oluşmuş kompozit malzemelerdir. Bileşiminde düşük sertliğe sahip reçine ve katı yağlayıcıların yanı sıra, çok yüksek sertliklere sahip aşındırıcı parçacıklar ve elyaflar yer almaktadır. Farklı aşınma davranışı gösteren bu bileşenler ve balata yüzeyinde biriken aşınma parçacıkları plato adı verilen temas alanlarını meydana getirirler [30]. Temas platoları, disk ile temas alanları olup toplam alanın %15 ile %20'si düzeyindedir. Bu alanlar farklı boyutlarda ve genellikle 50-500 mikron çapında ve birkaç mikron yüksekliğindedir. Temas bölgelerinin sertlik değerleri balata kompozisyonunun sertliğinden daha yüksektir [31]. Sürtünme esnasında balata yüzeyinin yalnızca sınırlı bir kısmı karşı yüzeyle gerçek temasa geçer. Gerçek temas alanları platoların toplam alanı karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Şekil 4'te temas platoları ve anlık gerçek temas alanları gösterilmektedir [30].

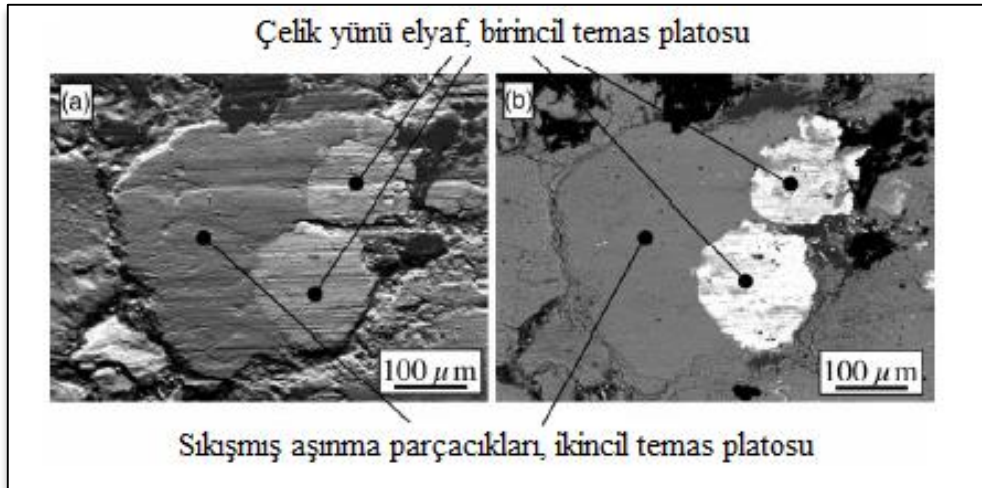


Şekil 4. Fren Balatası, temas platoları ve anlık gerçek temas alanlarının şematik gösterimi [30].

Temas platoları birincil ve ikincil platolar olmak üzere iki kısımdan oluşur. Birincil temas platoları balatanın daha yüksek aşınma dayanımına sahip, mekanik olarak kararlı ve aşınmaya dirençli bileşenlerinden oluşur. Bu bileşenler ikincil platoların oluşması ve büyümesi için çekirdeklenme yeri oluştururlar. Balata ve disk arasındaki kayma esnasında aşınma parçacıkları bu iki yüzey arasında hareket ederler. Aşınma parçacıkları yer yer birincil platoların arkasına sıkışarak burada birikir ve ikincil platoları oluştururlar (Şekil 5 ve 6) [30].



Şekil 5. Balata ve disk arasındaki temasın şematik gösterimi [30].

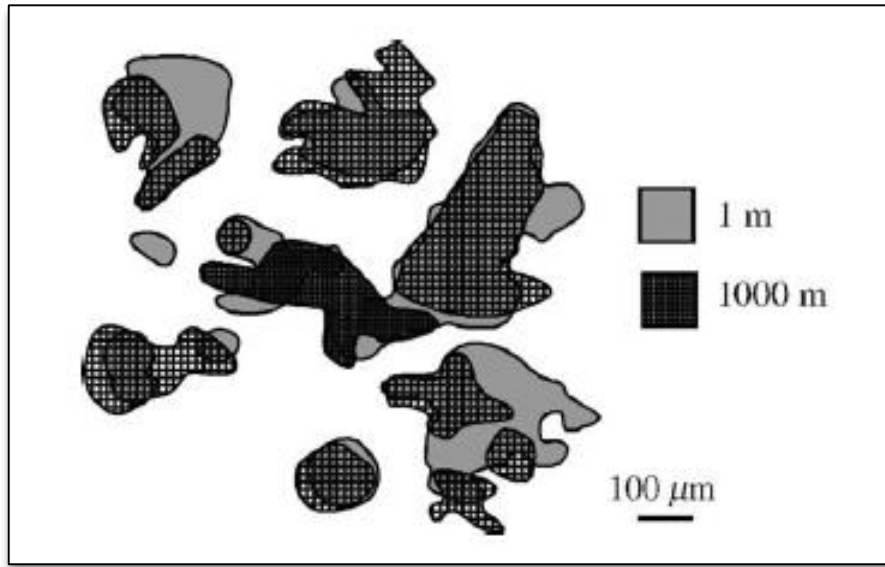


Şekil 6. Birincil ve ikincil temas platolarının SEM görüntüleri [30].



İkincil platoyu oluşturan aşınma parçacıkları normal kuvvet, kayma kuvveti ve sürtünme ısıyla sıkıştırılır. İkincil platolar, birincil platolardan sonra oluşurlar. İkincil platolar birincil platoların kopması veya aşınması ile bozulurlar. Ayrıca disk yüzeyindeki kirlenme ve düzensizlikler yoluyla veya ara malzemelerin aşındırmasıyla da ortadan kalkabilirler [30].

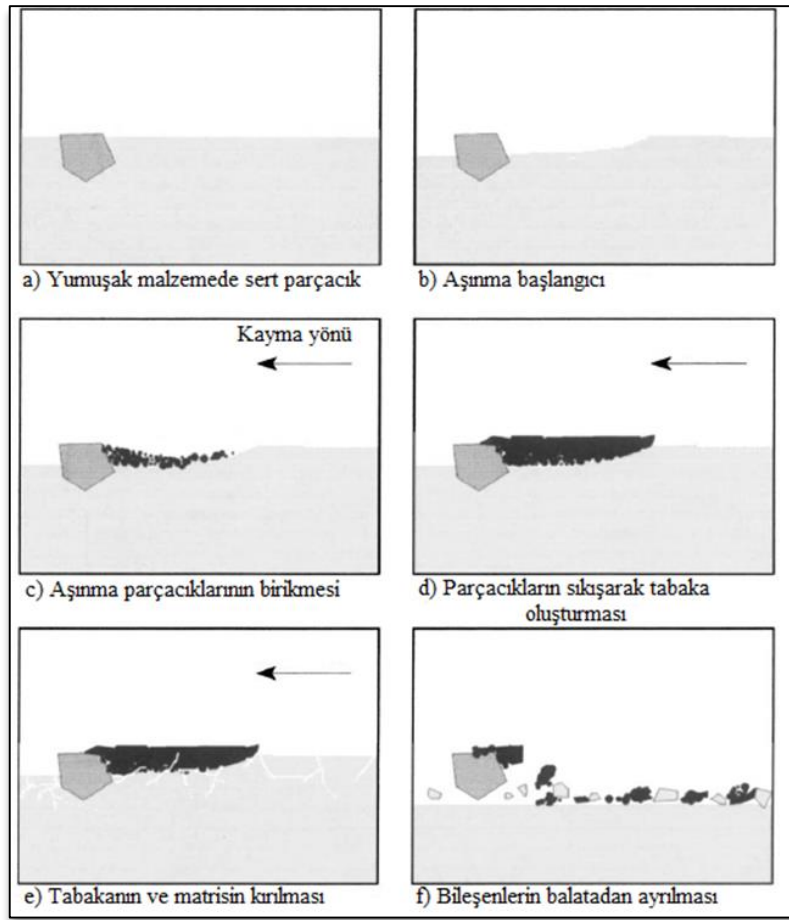
Balatanın belirli bir alanına tekrarlanan inceleme yapıldığında, temas platolarında meydana gelen şekil ve boyut değişimleri şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Balata yüzeyinde bulunan temas platolarının 1 m ve 1000 m kayma sonucunda ışık mikroskobu ile incelenmesi [31].

Metalik elyaflar gibi sert bileşenler, diske göre daha yüksek aşınma direncine sahip oldukları için, sürtünme esnasında kısa bir alışma evresini takiben diğer bileşenlere göre daha yüksekte kalırlar ve temas bölgelerinin merkezi olan birincil platoları oluştururlar. Sabit aşınma koşullarında, yükün büyük bir kısmını bu bölgeler taşır ve komşu malzemeleri korurlar. Alçak bölgeler kayma temasından hiçbir iz göstermezler. Alçak bölgelerden malzeme kaldırılması disk ve balata arasına kaçan aşınma parçacıkları tarafından gerçekleştirilen mekanik ayrışma ile olur (Şekil 8).

Sert bileşenlerin etrafında aşınmış parçacıkların birikmesi ve sıkışması ile temas bölgeleri büyür. Bu parçacıkların ara yüzeyde birikmesiyle sürtünme tabakası denilen koruyucu bir tabaka meydana gelir. Oluşan bu sürtünme tabakasının kalınlığı sıcaklıkla değişmektedir. 200 °C civarında sürtünme tabakasının kalınlığı 0-2,5 mikron iken, 700 °C’ de 0-5 mikrondur. Yüksek sıcaklıklarda aşınma oranının ve aşınma parçacıklarının miktarı daha fazla olduğu için sürtünme tabakasının kalınlığı daha fazla olur. Sürtünme tabakasının kalınlığının artması disk balata temas alanını azalttığı için sürtünmeyi azaltır bu nedenle aşınma oranı da azalır [28].



Şekil 8. Balata yüzeyinde mikro temasın oluşumu, büyümesi ve parçalanması [32].

Balatalarda sürtünme ve aşınma disk ve balata yüzeyleri arasındaki etkileşimin türü ile belirlenir. İki yüzey arasındaki etkileşimin türünü sıcaklık, hız, basınç, çevre şartları,

yüzey geometrisi, yüzey enerjisi, kimyasal reaksiyon, yüzeyin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirler [25].

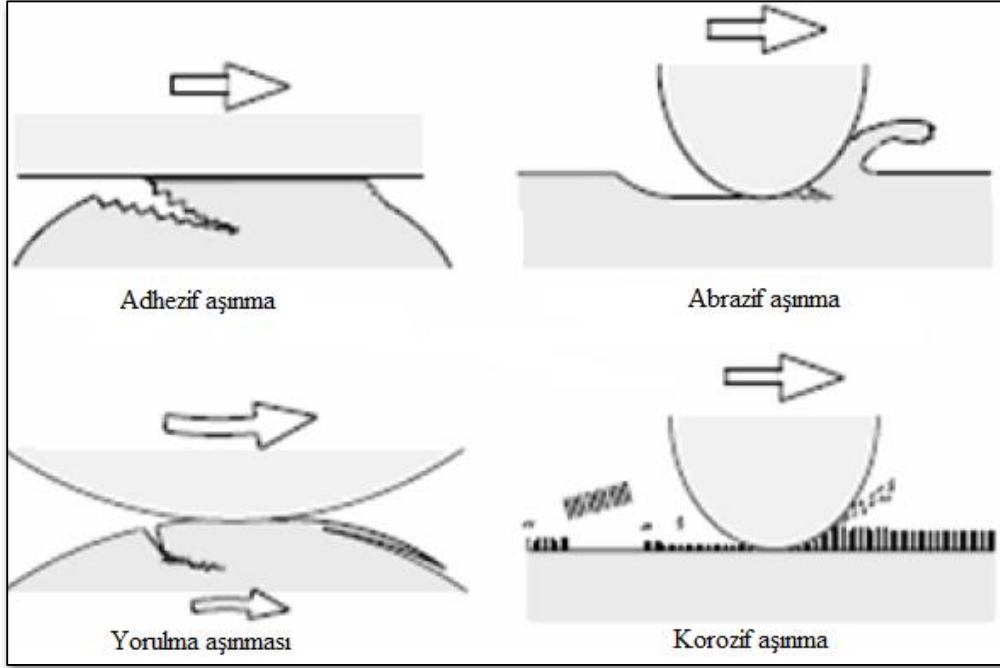
Aşınmanın başlaması ve devam etmesi için sürtünmenin olması gerekir. Sürtünen iki yüzeyin temas alanının aşınmaya etkisi büyüktür. Sürtünerek çalışan malzeme çifti arasındaki karşılıklı zorlama neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri vardır ve bundan dolayı farklı sınıflandırılmaları gerekmektedir. Aşınma, sıcaklık, malzeme, yük, hız, yağlayıcı tipi, ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesinden etkilenmektedir. Balataların aşınmasında çok sayıda aşınma mekanizması etkili olmaktadır. Bunların en önemlileri adhezif aşınma, abrazif aşınma, yorulma aşınması ve korozyon aşınmasıdır (Şekil 9) [13].

Adhezif aşınma kayma ara yüzeyinde metal-metal temas noktalarının soğuk kaynak oluşturması sonucu oluşur. Kaynak olmuş bu noktaların mukavemetinin en azından malzeme çiftinden birinin mukavemetinden daha fazla olması gerekir, böylece kayma ara yüzeyinde zayıf malzemedeki malzeme kopması meydana gelir. Benzer malzemeler kullanıldığında güçlü kaynak meydana gelir ve her iki yüzeyde de malzeme kaybı yaşanabilir [33].

Kayma esnasında balata ve disk yüzeyinde aşınan malzemeler sürtünme ara yüzeyinde sürtünme filmi meydana getirir. Frenlemeye devam edilmesi halinde, sürtünme filmi, aşınmış parçacıkların sıkışması, yüksek sıcaklıkla ergimesi, kesilmesi ve yassılaşması sonucu kat kat malzeme ile kaplanır. Yüksek sıcaklıklarda kayma yönünde plastik akma meydana gelir. Adhezyonun derecesi artan yük ve frenleme süresi ile artar. Adhezif aşınma metal- metal çiftlerinde meydana gelmektedir fakat polimer- metal çiftlerinde de görülebilir. Adhezif aşınma sürtünme kuvvetlerinin gerektirdiği kadar oluşur [28].

Daha sert olan malzeme çiftinin yumuşak karşı yüzeyi çizmesi, kesmesi ve mikrotalaşlar kaldırması şeklinde abrazif aşınma meydana gelir. Aynı etkiler karşı sürtünme elemanı yerine, daha önce balatadan ayrılmış aşınma parçacıkları tarafından da yapılmış olabilir. Bu tip aşınmada, yüzeyde çizikler, kesikler, çukurlar ve kopan parçacıklar görülür. Cismin sert yüzeyi nerede daha fazla pürüzlü ise aşınma miktarı orada daha fazladır. Abrasif aşınma oldukça yüksek hasara sebep olabilir. Disk – balata sürtünme çifti arasında meydana gelen abrazif aşınma ikinci veya üçüncü frenlemeden sonra gözlenmez. Çünkü ilk frenleme esnasında yüksek pürüzlülükler birbirine çarparak körelirler. Abrasif aşınma 100 N' dan düşük yüklerin altında meydana gelmemektedir.

Bunun sebebi de balata yüzeyindeki sert çıkıntıları köreltmek için yeterli yüke sahip olmamasıdır. Ancak sürtünme ara yüzeyindeki sert aşınma parçacıkları iki sürtünme çiftinden birine yaklaşırsa aşınma miktarında artış görülür [28].



Şekil 9. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi [13].

Yüzey bölgesinin tekrarlı tribolojik yüklenmeye maruz kalması sonucu yorulma aşınması meydana gelir. Tribolojik gerilmeler ile mekanik gerilmeler de meydana geldiğinden tekrarlı sürtünme hareketi sonucunda mikro çatlaklar oluşur, büyür ve aşınma parçacıkları olarak malzeme kopmasına yol açarlar. Yorulma aşınması plastik deformasyonun meydana gelmesi ile başlar [33]. Kaymanın ilk aşamalarında yüzeyde plastik deformasyon meydana gelir ve dislokasyonlar oluşur. Fren balata malzemesi içindeki sert parçacıklar ve inklüzyonlar dislokasyon hareketi engeller ve dislokasyonların yığılmasına neden olur. Dislokasyonların yığılması ile mikroboşluklar meydana gelir. Bu boşlukların büyümesi veya birleşmesi ile mikro çatlaklar oluşur. Kayma ilerledikçe mikro çatlaklar kayma yönüne paralel şekillenir ve birbirleriyle birleşerek aşınmaya neden olur. Mikro çatlaklar artan basınç ve frenleme sayısı ile büyürler. Frenleme devam ettikçe meydana gelen tekrarlı plastik deformasyon sonucunda çizgisel boşluklar oluşur [28].

Korozyon aşınması, kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonun çevresel olarak fazla olması durumunda meydana gelir. Korozyon aşınması genellikle hafif bir aşınma şeklidir ancak yüksek sıcaklık veya nemli ortamlarda ağır hasarlara neden olabilir. Oksitleyici aşınma bir korozyon aşınmasıdır ve oksijenle kimyasal reaksiyon veya baskın bir oksitleyici ortam olması durumunda görülür [33]. Oksidatif aşınma öncelikle fren disk veya kampanasında yaklaşık 180 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelir. Fren diski üzerinde oksit filmi oluşumu, disk aşınmasında azalmaya ve genellikle sürtünme çiftleri arasındaki etkileşim sebebiyle balatada da aşınmanın azalmasına neden olur [28].

Malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları sürtünme yüzeyleri arasındaki etkileşim ile belirlenir. Kompozit malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, abrazyon aşınma özellikleri, işletim şartları, basınç, hız, yüzey özellikleri, sıcaklık, yağlama, sürtünme katsayısı, özgül aşınma miktarı ve aşınma mekanizması sürtünme malzemesinin performansını etkileyen faktörlerdir [1,34].

### **1.5. Balataların Sürtünme Performansını Etkileyen Faktörler**

Fren etkinliği, fren sürtünme momentinin uygulanan kuvvete oranıdır. Fren etkinliğinin ölçüsü olarak alışmış ve alışmamış fren etkinliği, feyd dayanımı, feyd geri kazanımı, kayma hızına duyarlılık, etkinlik değişmesi, çevreye duyarlılık gibi özellikler kullanılmaktadır [33]. Sürtünme malzemeleri yeni iken alışmamış haldedir ve karşı yüzeyle olan teması yüzey geometrisine bağlıdır. Yeni balata takıldığında genellikle fren etkinliği daha düşüktür ve alışmış olması durumuna göre değişkenlik gösterir. Fren balatasının başlangıçtaki bu davranışına alışmamış etkinlik denir. Karşı yüzey ile balata arasında tam yüzey teması sağlandığında ve balata temas yüzeyinin tamamında kararlı bir kömür tabakası oluştuğunda, balata tamamen alışmış olur. Fren performansı, balata yüzeyinin % 85-90'ı karşı yüzeye temas ettiğinde kararlı duruma gelir ve bu durumdaki fren etkinliği alışmış etkinliktir.

Ağır frenleme şartlarında balatada meydana yüksek sıcaklık sonucu fren etkinliğinin kaybolmasına fren feydi denilmektedir. Beş tip fren feydi meydana gelebilir:

- Yükselen balata sıcaklığından dolayı (ısıl feyd)
- Soğuma sırasındaki reçine geçişi nedeniyle (gecikmiş feyd)
- Balatada yüzeye yakın gaz kabarcıklarının oluşması yüzünden (kabarcık feydi)
- Yüksek hız ve ağır yüklerde frenleme sonucu (flaş feydi)

— Yüzeye dışarıdan gelen su ve yağ ile oluşan kısmi yağlama yüzünden (kirlenme feydi) [33].

Balatalar, kayma hızındaki değişimlere karşı farklı sürtünme davranışları gösterirler. Hız duyarlılığı, balata malzemesinin tipi, bileşimi, sıcaklık, basınç ve kullanım şartlarına göre değişkenlik gösterir. Fren etkinliği artan hız ile genellikle azalmaktadır.

Frenler, balata ıslak olsa bile aracı güvenli bir şekilde durdurabilmelidir. Disk ve kampana frenleri ıslak olduklarında etkinlik kaybı gösterebilirler. Küçük bir parça yağ, su ile bir araya gelince yağlama işlevini artırır. Ayrıca nem, dökme demir disk yüzeyinin paslanmasına ve balatanın tutunmasına neden olabilir. Nemsiz çevre şartlarında da balata ile dökme demir disk arasında pas bağı kurulabilir. Pas bağından ayrı olarak disk malzemesinin kendisi de paslanabilir. İdeal bir fren sistemi çok az nem duyarlılığı göstermeli veya hiç göstermemelidir. Sürtünme yüzeyinde nem ve pas olması birkaç fren kullanımı için etkili olur. Daha sonra sıcaklık artınca nem balatadan uzaklaşır ve balata malzemesine katılan aşındırıcılar da disk yüzeyindeki pasın temizlenmesini sağlar [33].

## 1.6. Balatalardan İstenen Özellikler

Fren sistemlerinde sürtünmeyi sağlayan temel eleman fren balatasıdır. Diskin hızını yavaşlatmak veya durdurmak için kinetik enerji sürtünme işi tarafından ısıya dönüştürülmektedir. Ara yüzeyde oluşan sürtünme kuvveti sürtünme katsayısına bağlı olarak değişir. Frenlemenin en yüksek verimle yapılabilmesi için en önemli kriterlerden biri yüksek sürtünme katsayısıdır. Bunun için bir fren sisteminde sürtünme katsayısını etkileyen faktörler tasarımda önemli yer tutmaktadır. Bu faktörler arasında daha önce belirtildiği gibi; kayma hızı, frenleme basıncı, sıcaklık, frenleme süresi ve sayısı, disk ve balata malzemeleri yer almaktadır. Ancak temel olarak bir fren sisteminde sürtünme ve performans balata yapısına bağlı olarak değişir. Literatürde balatalardan istenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısına sahip olmalı,
- Farklı çalışma şartlarında sabit sürtünme performansı,
- Aşınmaya karşı direnci yüksek olmalı,
- Disk malzemesine zarar vermemeli,
- Düşük sıkıştırılabilirliğe sahip olmalı,
- Yüksek sıcaklık direnci,

- Yüksek ısı iletkenliği,
- Gürültü ve titreşim en düşük düzeyde olmalı,
- Çevreye ve insan sağlığına zarar vermemeli,
- Kolay ve ucuz üretilebilmeli,
- Beklenen ömür süresini sağlayabilmelidir.
- Yüksek sıcaklık direnci,
- Yüksek korozyon direnci,
- Yüksek mekanik mukavemet [13,28,33].

### **1.7. Disk ve Kampana Malzemeleri**

Karsı malzemenin, sürtünme özellikleri ile verimli bir şekilde çalışabilmesi için, sistemin mekanik ve ısı zorlamalarına karşı dayanıklı olması gerekir. Balata ve karşı malzemede (diskte) sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının, biran önce sistemden uzaklaştırılması istenir. Bunun için disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması gerekmektedir. Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeni ile disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısı genleşme katsayısının küçük olması istenir. Ayrıca fren esnasında kısa zamanda meydana gelen yüksek ısı miktarları, kampana veya disk tarafından alınıp iletilerek dışarıya verileceğinden, disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletme kabiliyetine sahip olması gerekir [13].

### **1.8. Literatür Araştırması**

Literatürde sürtünme malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar genellikle kompozit formülasyonu ve değerlendirilmesi üzerinedir. Bu durum çok bileşenli malzemelerin tribolojik mekanizmalarının karmaşık olmasından kaynaklanmaktadır. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle çeşitli elyaf ve matris bileşimleri incelenmiştir. Katı yağlayıcı ve aşındırıcıların etkileri üzerine sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Öztürk ve arkadaşları farklı oranlarda yağlayıcıların ve aşındırıcıların sürtünme malzemelerinin tribolojik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Yağlayıcı olarak grafit ve hegzagonal bor nitrür (h-BN), aşındırıcı olarak ise alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ve bor karbür

(B<sub>4</sub>C) kullandıkları çalışmalarında, artan aşındırıcı oranı ve azalan yağlayıcı oranı ile numunelerin sürtünme katsayıları ve özgül aşınma miktarlarının arttığını gözlemlemişlerdir. Aşınmış numune yüzeylerini ve aşınma parçacıklarını X-ray spektrometre aparatlı taramalı elektron mikroskobu ile incelemişler ve numune yüzeylerinde ve aşınma parçacıklarında ki demir oranının azalan yağlayıcı oranı ve artan aşındırıcı oranı ile arttığını tespit etmişlerdir [35].

Cho ve arkadaşları, fren sürtünme malzemelerinde üç farklı katı yağlayıcının (Grafit, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, MoS<sub>2</sub>) sürtünme karakteristiklerinin, balataların tribolojik özelliklerine etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Bileşimlerinde sırasıyla % 10 grafit, % 7 grafit + % 3 Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ve % 7 grafit + % 3 MoS<sub>2</sub> içeren üç balata numunesi üretmişler ve bir fren dinamometresi kullanarak sürtünme malzemelerinin tribolojik özelliklerini belirlemişlerdir. Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ve grafit, balataların sürtünme katsayısı kararlılığını ve feyd dayanımlarını arttırmıştır. MoS<sub>2</sub> içeren sürtünme malzemelerinde ise yüksek sıcaklıklarda yağlayıcıların bozunması nedeniyle aşınma özelliklerinde gerileme ve feyd dayanımında düşme görülmüştür. Grafit içeren numuneye Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> eklenmesi sürtünme katsayısı değerinin yüksek sıcaklıklarda da korunmasına neden olmuştur. Feyd dayanımındaki bu artışın nedeni Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>'den yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı özelliği gösteren Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşmasıdır [36].

Chen ve bir grup araştırmacı, bakır esaslı balata malzemelerinin tribolojik özelliklerine grafit ve h-BN'ün etkilerini incelemişlerdir. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen 5 adet numune sırasıyla ağırlıkça % 0, 2, 5, 8, 10 grafit ve karşılığında % 10, 8, 5, 2, 0 h-BN içeren bileşimlerde üretilmiştir. Grafit ve h-BN'ün tribolojik özelliklere etkisi block-on-rig tipi test cihazı ile incelenmiştir. Chen ve arkadaşları bu çalışma ile grafitin yağlayıcı etkisinin h-BN'ün yağlayıcı etkisinden daha üstün olduğunu tespit etmiştir. Artan grafit miktarı ile numunelerin özgül aşınma miktarlarında ciddi düşüş görülmüştür. Az miktarda h- BN içeren numunelere grafit eklenmesi kararlı sürtünme katsayısına ve iyi aşınma özelliklerine neden olmuştur. Grafit içeren numunelerde daha yoğun yağlayıcı içeren sürtünme filmi oluşmuştur. Bu zengin yağlayıcı içeren film numunelerin aşınma dayanımını arttırmıştır. Tüm numunelerde yüksek kayma hızlarında daha yoğun ve kararlı sürtünme filmi meydana geldiği için düşük kayma hızlarına göre daha az aşınma meydana gelmiştir [37].

Yi ve Yun yaptıkları çalışma ile kalsine petrol koku (CPC) ve h-BN'ün birlikte (hibrit) kullanılmasının kompozit fren balatalarının aşınma miktarını ciddi seviyede düşürdüğünü ve kararlı sürtünme katsayısı meydana getirdiğini bulmuşlardır. Dayanıklı ve



düzgün sürtünme filmi balatanın disk yüzeyi ile temasını azaltmakta ve böylece şiddetli aşınmanın önüne geçmektedir. Bu iki yağlayıcının hibrit olarak kullanılması, CPC' nun düşük sıcaklıklardaki yağlama kabiliyetinin ve h-BN' ün yüksek sıcaklıklardaki yağlama kabiliyetinin birbirini tamamlayarak balatanın sürtünme ve aşınma özelliklerinin gelişmesine neden olmuştur [38].

Kim ve arkadaşları asbestsiz organik balata malzemelerine farklı oranlardaki grafit ve antimuan trisülfürün ( $Sb_2S_3$ ) etkisini incelemiştir. Sürtünme katsayısının, uygulama basıncı, kayma hızı ve sıcaklıkla değişimini belirlemişler ve her iki yağlayıcıyı da içeren numunelerin tek bir yağlayıcı içeren numuneye göre daha kararlı sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve kayma hızından daha az etkilendiğini bulmuşlardır. Ayrıca grafit miktarının artmasının numunelerin feyd dayanımlarını arttırdığını tespit etmişlerdir [39].

Lavik ve diğerleri de yağlayıcı içeren sürtünme filmlerinin oksidasyonu sonucunda aşınma dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir. Gardos da kayma düzleminde hareket halinde olan sürtünme filmleri içinde meydana gelen oksit tabakasının difüzyonu engellemesi nedeniyle aşınmayı düşürdüğünü belirtmiştir [39].

Yi ve Yan hacimce %10 CPC, h-BN ve TP (talcum powder) ilave edilen sürtünme balatalarının eğilme dayanımlarının ve aşınma dayanımlarının ciddi miktarda arttığını tespit etmiştir. Aynı zamanda bu numunelerin sürtünme katsayıları 0,43-0,47 aralığındadır. %10 h- BN içeren numune en iyi aşınma dayanımına ve en kararlı sürtünme katsayısına sahip numune olmuştur. Bu mükemmel özellikleri kayma ara yüzeyinde oluşan düzenli ve yoğun sürtünme filmi sağlamıştır [40].

Jang ve Kim [41] farklı oranlarda antimuan trisülfür ( $Sb_2S_3$ ) ve zirkonyum silikat ( $ZrSiO_4$ ) içeren sürtünme malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlardan  $Sb_2S_3$  ve  $ZrSiO_4$ ' in nispi oranlarının numunelerin sürtünme davranışlarında önemli rol oynadığını tespit etmişlerdir. Artan  $Sb_2S_3$  ve azalan  $ZrSiO_4$ ' la numunelerin hem sürtünme katsayılarının hem de özgül aşınma miktarlarının azaldığını,  $Sb_2S_3$ ' in numunelerin sürtünme kararlılığını geliştirdiğini,  $ZrSiO_4$ ' in ise sürtünme momentindeki değişimi şiddetlendirdiğini gözlemişlerdir.

Ma ve arkadaşları da  $ZrSiO_4$ ' in organik kompozit fren balatalarının sürtünme performansına olan abrasif etkisini incelemişler ve  $ZrSiO_4$ ' in sürtünme katsayısını arttırdığını tespit etmişlerdir. Yaptıkları yüzey incelemeleri sonucunda sürtünme filminin abrasif miktarı, yüzey özellikleri, sıcaklık, zaman ve numune kompozisyonuna bağlı olarak farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir. Zirkon içermeyen numunede yüksek sıcaklıklarda

barit filminin oluştuğunu ve bu film tabakasının balata malzemesinin aşınma davranışına olumlu etkisi olduğunu bulmuşlardır [42].

Cho ve bir grup araştırmacı ise dört farklı tane boyutuna sahip  $ZrSiO_4$  ( $1\ \mu m$ ,  $6\ \mu m$ ,  $75\ \mu m$ ,  $150\ \mu m$ ) kullanarak kompozit balata malzemesi üretmişler ve abrasif tane boyutunun sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, balatanın aşınması ve karşı yüzeyin aşınması üzerine etkilerini incelemişlerdir. İri taneli zirkon içeren numune, yüzeyinde meydana gelen kararlı sürtünme filmi sayesinde en iyi sürtünme performansına ve en düşük aşınma miktarına sahiptir. Diğer taraftan ince zirkon taneleri içeren numunede ise oluşan geçici sürtünme filmi şiddetli aşınmaya ve zayıf sürtünme performansına sebep olmuştur. Ayrıca iri tanelerin karşı yüzeyde daha fazla aşınma meydana getirdiğini tespit etmişlerdir [43].

Matejka ve arkadaşları ise  $40\ \mu m$ ,  $10\ \mu m$  ve  $3\ \mu m$  boyutlarındaki silisyum karbür ( $SiC$ ) içeren numunelerle yaptıkları testler sonucunda, en yüksek sürtünme katsayısı değerini ve en iyi feyd dayanımını  $3\ \mu m$  boyutunda  $SiC$  içeren numunede elde etmişlerdir. Cho ve arkadaşlarının bulduğu gibi, iri taneli numunelerin daha az aşındığını ve aşındırıcı tane boyutu arttıkça karşı yüzeyin daha fazla aşındığını tespit etmişlerdir. Tang de farklı tane boyutlarındaki alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ile yaptığı çalışma sonucunda iri taneli aşındırıcı içeren numunelerin ince taneli aşındırıcı içeren numunelerden daha az aşındığını belirtmiştir [44].

Lee ve diğerleri yaptıkları çalışma ile zirkon ve kuvars içeren numunelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını kıyaslamışlardır. İnce ve iri taneli zirkon ve kuvars kullanarak dört farklı numune üretmişler ve kuvars içeren numunelerin her iki durumda da zirkon içeren numunelerden daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca ince aşındırıcı tanelerin sürtünme katsayısını arttırmada daha etkili olduğunu ve iri aşındırıcı tanelerin yüksek sıcaklıklarda sürtünme malzemesinin ısıl dayanımı arttırdığını gözlemlemişlerdir [45].

Bijwe ve arkadaşları micro ve nano boyutta alüminyum oksit,  $SiC$  ve silikanın sürtünme ve aşınma davranışlarını inceledikleri çalışmada nano boyutlu aşındırıcıların balataların sürtünme performansına ciddi olumlu etkileri olduğunu bulmuşlardır. Nano partikül içeren numunelerde meydana gelen ince sürtünme filminin aşınma dayanımı arttırdığını gözlemlemişlerdir [46]. Etemadi ve arkadaşları ise nano boyutlu alüminyum oksit parçacıklarının sürtünme katsayısını düşürdüğünü bulmuşlardır. Nano alüminyum oksitinin çok küçük ve pürüzsüz kenarları aşındırıcı etkisini azaltmakta ve bu nedenle

sürtünme katsayısında düşüş meydana gelmektedir. Fakat nano alüminyum oksit tarafından meydana getirilen kararlı ve ince sürtünme filmi numunelerin aşınma dayanımı arttırmıştır. Nano alüminyum oksit tanelerinin matris malzemesi ile etkileşimi arttırması nedeniyle mekanik özellikler gelişmiştir. Ayrıca nano alüminyum oksit parçacıklarının balataların ısı iletkenliğini arttırması nedeniyle, matris malzemesinin bozunması gecikmekte ve feyd dayanımı artmaktadır [47].

Tomasek ve arkadaşları yaptıkları çalışmada uygun oranda alüminyum oksit ilavesinin kararlı sürtünme katsayısı sağladığını ve aşınma dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir. % 0, 3.4, 5.6, 9.0 ve 14.6 oranında alüminyum oksit içeren 5 adet numuneden en iyi sürtünme ve aşınma sonuçlarını % 5.6 oranında alüminyum oksit içeren numune göstermiştir. Numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde barit filmi, demir içeren bölgeler, yivler ve aşınmış demir içeren sürtünme filmleri gözlemlenmiştir. Barit filmi sadece % 0, 3.4 ve 5.6 alüminyum oksit içeren numunelerde görülmüştür. Sürtünme filmi bileşimindeki demir miktarı alüminyum oksit miktarı ile doğru orantılı artmaktadır [48].

Kim ve diğerleri silisyum karbür (SiC), zirkonyum ( $ZrSiO_4$ ), kuvars ve magnezyum oksitin (MgO) içeren balata malzemelerinin sürtünme davranışlarını incelemişler ve aşındırıcıların kırılma tokluğunun sürtünme performansı, aşınma miktarı ve stick-slip mekanizmasında önemli etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Silisyum karbür içeren numune frenle esnasında mikro kesme davranışı sergileyerek oldukça şiddetli stick-slip hareketi yapmıştır ve yüksek sese neden olmuştur. Kırılma tokluğu daha düşük kuvars ve magnezyum oksit içeren numunelerde ise stick-slip hareketi küçük genlikte meydana gelmiştir. Aşındırıcıların kırılma tokluğu ve sertliğinin sürtünme malzemelerinin gürültü ve titreşim özelliklerini belirleyen en önemli etken olduğunu belirlemişlerdir. Numuneler sürtünme katsayılarına göre sıralanırsa en yüksek değer SiC içeren numunede ve sırasıyla zirkon, kuvars ve magnezyum oksit içeren numunede gözlenmiştir. Tüm numunelerin sürtünme katsayıları zamanla azalmış ve sabit bir değer elde etmiştir. Bunun nedeni sert aşındırıcı kenarlarının körleşmesi ve etrafının aşınma parçacıkları ile dolmasıdır [49].

Sasada ve arkadaşları aşındırıcıların tane şeklinin ve tane boyutunun balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarına etkilerini incelemişler ve belirli bir boyuttan ince tanelerin adhezif aşınma mekanizmasında yüzeyde biriken aşınma parçacıklarının uzaklaştırılmasında etkili olduğunu bulmuşlardır. Sin ve arkadaşları ise aşındırıcı tane yapısı ve boyutunun aşınma mekanizmasının belirlenmesindeki etkisinden ve dolayısıyla özgül aşınma miktarına olan etkisinden bahsetmiştir. Sürtünme ara

yüzeyinde meydana gelen aşınma mekanizması aşındırıcının tane yapısı ve boyutu ile değişmektedir [49].

Hamid ve Stachowiak dışarıdan gelen sert parçacıkların sert frenleme koşullarında balatanın sürtünme performansına etkilerini incelemiştir. Sürtünme katsayısının sert parçacıkların varlığından etkilendiğini ve sert parçacıkların efektif temas alanını azalttığı için sürtünme katsayısını düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Disk yüzeyi çizildiğinde temas alanı azalmaktadır [50].

### **1.9. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı**

Kompozit fren balataları hakkında yapılan çalışmalar sürtünme ve aşınma davranışlarını belirlemek üzerine yapılmıştır. Çok bileşenli malzemeler olan kompozit fren balatalarının tribolojik özellikleri çok karmaşık olduğundan yapılan araştırmalarda kompozit formülasyonu ve değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Balata üretimi ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle çeşitli elyaf ve matris bileşenleri incelenmiştir. Ancak aşındırıcı ve yağlayıcıların etkilerinin incelendiği çalışmalar yeterince mevcut değildir.

Bu çalışma iki aşamadan meydana gelmektedir. Çalışmanın ilk kısmında aşındırıcı ve yağlayıcıların otomotiv fren balatalarının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Değişen oranlarda alüminyum oksit, grafit, bor karbür ve hegzagonal bor nitrür kullanılarak üretilen sürtünme malzemelerinin sürtünme ve aşınma performansları incelenerek en uygun yağlayıcı ve aşındırıcı tipini belirlemek amacıyla testler yapılmıştır. Ayrıca aşınan yüzeyler ve aşınma parçacıklarının sem görüntüleri incelenerek etkin aşınma mekanizmalarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise farklı tane boyutuna sahip aşındırıcıların balataların tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalar iki aşamalı olup birinci aşamada yağlayıcı ve aşındırıcıların fenolik reçine esaslı kompozit fren balatalarının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. İkinci aşama da ise farklı tane boyutuna sahip aşındırıcıların fren balatalarının tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Çalışmanın her iki aşamasında da üretilen numuneler asbest içermeyen fenolik reçine esaslı organik balata olup, matris malzemesi olarak fenolik reçine, takviye malzemesi olarak kevlar ve taşıyıcı elyafı kullanılmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında üretilen numunelerde dolgu malzemesi olarak barit, vermikülit ve bronz, aşındırıcı olarak alüminyum oksit, bor karbür, yağlayıcı olarak grafit ve h-BN kullanılırken ikinci aşamada üretilen numunelerde barit yerine kalsiyum karbonat, aşındırıcı olarak alüminyum oksit, bor karbür, silisyum karbür, yağlayıcı olarak da h-BN kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmektedir.

Fenolik reçine, Hexion firmasına ait Cellobond J115H modifiye fenolik novolac reçinesidir. Kaju cevizi kabuğundan elde edilen sıvı ile modifiye edilmiştir. Hekzamin karıştırılmış olarak ince toz formundadır. Yoğunluğu  $1,27 \text{ g/cm}^3$ 'dür.

Taşıyıcı elyafı, Lapinus firması tarafından üretilen Rockbrake RB220-Roxul 1000 elyafıdır. Elyaf uzunluğu  $230 \pm 50 \mu\text{m}$ , elyaf yarıçapı ortalama  $9 \mu\text{m}$ , Mohs sertliği 6, erime noktası  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  üzerinde, yoğunluğu  $2,75 \text{ g/cm}^3$ 'dür.

Aramid elyaf, DuPont firması tarafından üretilen kevlar aramid pulp olup, yoğunluğu  $1,44 \text{ g/cm}^3$ , elyaf çapı  $12 \mu\text{m}$ , elyaf uzunluğu  $0,5-1 \text{ mm}$ , çekme mukavemeti  $3600-4100 \text{ MPa}$ , elastisite modülü  $80-85 \text{ GPa}$ , kopma uzaması  $\%3,3$ , ısıl genleşme katsayısı  $-2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , çalışma sıcaklığı  $-200-350 \text{ }^\circ\text{C}$  ve bozunma sıcaklığı  $425-530 \text{ }^\circ\text{C}$ ' dir [25].

Bronz, yoğunluğu  $8 \text{ g/cm}^3$ , ısı iletim katsayısı  $86-116 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , ergime sıcaklığı  $900^\circ\text{C}$  bileşimi  $\%80-83 \text{ Cu}$  ve  $\%20-17 \text{ Sn}$ 'dir. Ortalama tane büyüklüğü  $72 \mu\text{m}$ 'dir.

Barit, kimyasal bileşimi,  $\text{BaSO}_4$  olan barit ortorombik kristal yapıdadır. Yüksek özgül ağırlığı, kristal dizilişi, kristal şekli ve asitte çözünmezlik başlıca özellikleridir.

Düşük sıcaklıkta meydana gelen hidrotermal damarlarda yaygın olarak bulunan bir baryum mineralidir. Bakır, kurşun, çinko, nikel ve gümüş yataklarında, kalsit, kuvars, fluorit, dolomit ve siderit ile birlikte bulunur. Yoğunluğu  $4,45 \text{ g/cm}^3$ , Mohs sertliği 3-3,5 dur. Kullanılan baritin tane büyüklüğü ortalama 104 mikrondur [23].

Vermikülit, monoklinik kristal yapıda, levhamsı ve plaka şekilli kristaller halinde doğada bulunur. Sarı kahverengimsi renkte parıltılıdır. Isıtıldığında kolayca genleşir. Mohs sertliği 1,5 ve yoğunluğu  $2,5 \text{ g/cm}^3$ 'dür [24].

Kalsiyum karbonat, halk arasında kireç taşı olarak bilinen bir tür kimyasal bileşiktir. Bileşik formülü  $\text{CaCO}_3$  şeklindedir. Dünyada en çok bulunan maddelerden biri olan ve çok geniş kullanım alanına sahip kalsiyum karbonatın Mohs sertliği 3, yoğunluğu  $2,93 \text{ g/cm}^3$  'dür [51].

Grafit, kimyasal bileşimi C olan, hegzagonal kristal yapıda ve düz, levhamsı kristaller şeklinde, genellikle ince-iri yapraklanmalı kütleler halinde ve pullar halinde bulunur. Mohs sertliği 1-2, yoğunluğu  $2,1 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Demir siyahı veya çelik grisi renğinde opaktır. Başlıca özellikleri aşırı yumuşak olması, yağlı görünümü, kağıdı ve eli çizmesidir. Kullanılan grafitin ortalama tane büyüklüğü ise 45 mikron elek altıdır [51].

h-BN, hegzagonal bor nitrür, beyaz renkli olup, yapısal yönden grafitte benzeyen, zehirsiz, geçirimsiz ve kaygan bir malzemedir. Seramik malzemeler içinde en düşük yoğunluklu olanıdır ( $2,27 \text{ g/cm}^3$ ). Çok yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır (inert atmosferde  $3000^\circ\text{C}$ 'ye kadar, hava ortamında  $1000^\circ\text{C}$ 'ye kadar). Isıl şok dayanımı çok yüksektir. Mükemmel elektrik yalıtımı ve ısı iletimi özelliğine sahiptir. Mükemmel yağlayıcılık özelliğine sahiptir. Yük, yüzey pürüzlülüğü, yağ özelliklerinde bozulma gibi sebeplerle yağ filmi yeterli olmayabilir. h-BN kristalleri tüm yüzeylere ve boşluklara nüfuz eder. Yağ zorlandığında metale göre daha kolay h-BN üzerinde kayar ve yağ filmi daha uzun dayanır. Kopma yaşandığında h-BN parçaları birbirine temas eder ve yağlamanın devamlılığını sağlar [52].

Alüminyum Oksit, elektro korundun grubuna aittir. Elektrik ark ocaklarında kilin eritilmesi ile üretilir. Beyaz alüminyum oksit demir içermez, üst düzeyde saflıkta ve yüksek derecede sertliktedir. Kimyasal bileşimi,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve hegzagonal kristal yapıdadır. Yoğunluğu  $3,97 \text{ g/cm}^3$ , Mohs sertliği 9 dur. Erime sıcaklığı  $2050^\circ\text{C}$  ve ergime ısısı  $5100\text{--}6000 \text{ cal/gr.mol}$  olarak belirtilmiştir [51].

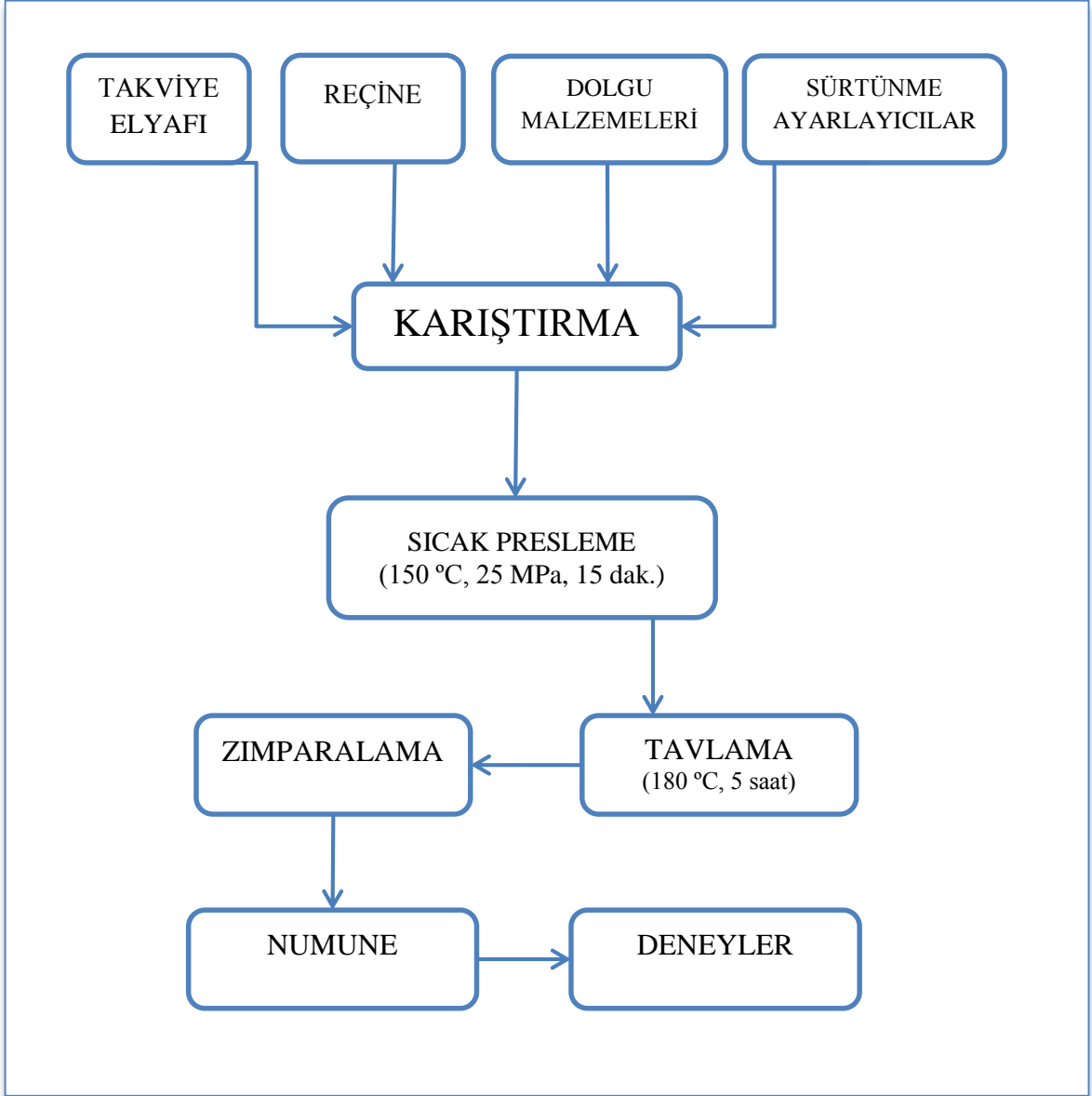
Silisyum Karbür, kuvars kumu ve petrol kokundan elektrikli gerilim fırınlarında  $2300^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda üretilen kristalli silisyum karpitten meydana gelir. Silisyum karpit

demir içermez, kırıntılı ve son derece serttir. Erime noktası 2300 °C üzerindedir, yoğunluğu 3,2 g/cm<sup>3</sup>, Mohs sertliği 9,5 dur [51].

Bor karbür, yüzlerce bor bileşiği arasında yüksek pazar hacmine sahip önemli bir bor uç ürünüdür. İleri teknolojik seramik malzemesi olan bor karbür yüksek sertliği, düşük yoğunluğu, kimyasallara karşı direnci, ısıya dayanımı ve yüksek nötron absorblama özellikleri nedeni ile birçok askeri ve sivil uygulamada kullanılmaktadır [27]. Kimyasallara karşı yüksek kararlılığı, iyi mukavemet özellikleri, nötron emme kabiliyeti, düşük yoğunluğu gibi birçok üstün özelliğiyle zırh uygulamaları, nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu, kesici ve delici uçlar, aşındırıcılar gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrür (cBN)'den sonra en sert üçüncü malzemedir. Yoğunluğu 2,52 g/cm<sup>3</sup>, Mohs sertliği 9,5 dur [27].

## 2.2. Numune Üretimi

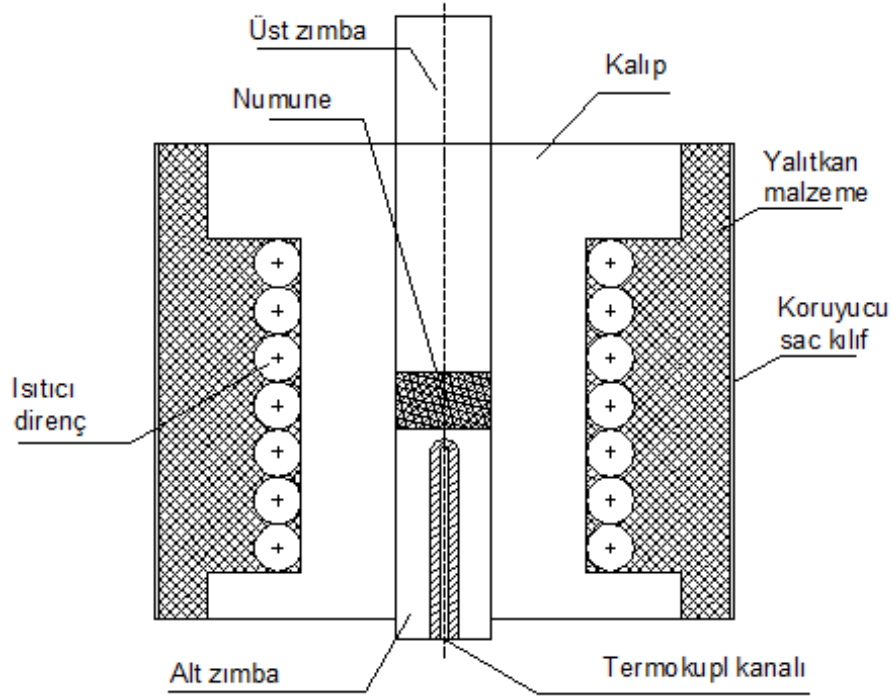
Balata bileşenleri 0,1 mg hassasiyetle tartıldıktan sonra, 3-4 dakika süreyle bir mikserde karıştırıldı. Daha sonra karışım 150 °C sıcaklık, 25 MPa basınca sahip kalıpta 15 dakika tutularak sertleştirildi. Sertleşmenin tamamlanması için numuneler 180 °C sıcaklığa sahip fırında 5 saat süreyle tutuldu. Üretilen numuneler talaşlı işleme tabi tutularak deneylere hazır hale getirildi (Şekil 10).



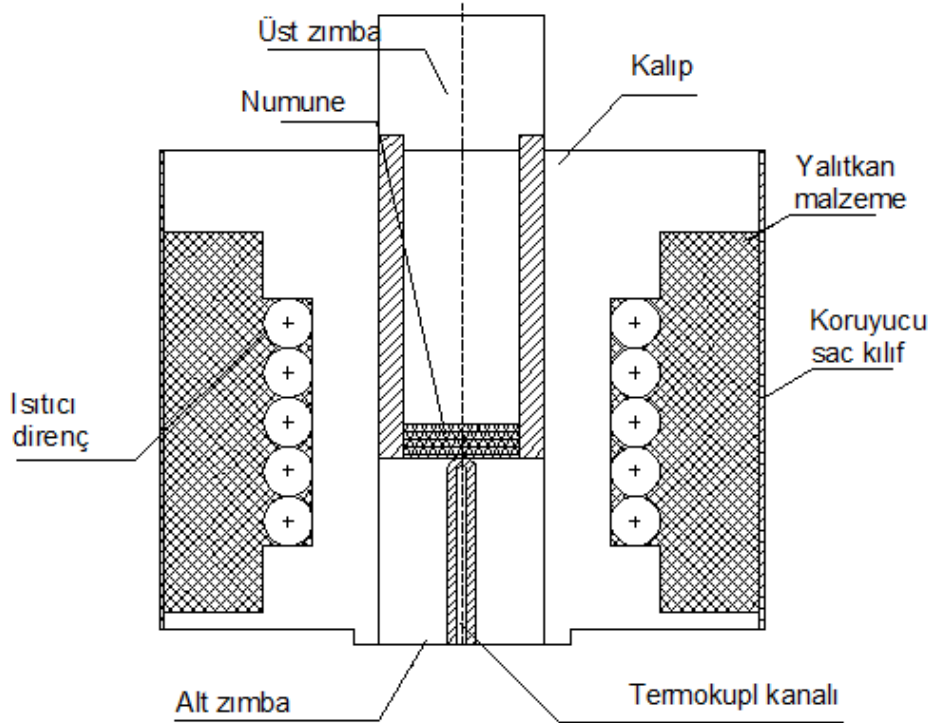
Şekil 10. Numune üretimi işlem akış diyagramı

Sürtünme ve aşınma testlerinin yapıldığı numunelerin üretildiği kalıp resmi Şekil 11’ de verilmiştir. Mekanik testlerin yapıldığı numunelerin üretildiği kalıp resmi Şekil 12’ de verilmiştir.





Şekil 11. Sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı testlerinin yapıldığı numunelerin üretim kalıbı şematik resmi



Şekil 12. Mekanik testlerin yapıldığı numunelerin üretim kalıbı şematik resmi

### 2.2.1. Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Üretimi

Çalışmada incelenen numuneler asbest içermeyen organik (NAO) türde olup reçine, elyaf, kevlar, dolgu malzemesi ve sürtünme ayarlayıcı malzemeler içermektedir. Üretilen numunelerde matris malzemesi olarak fenolik reçine kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak 9 µm çapında 230±50 µm uzunluğunda Lapinus RB220 elyafı kullanılmıştır. Çalışmanın 1. aşamasında üretilen numunelerde aşındırıcı ve yağlayıcıların hacimsel oranları değişken olarak alınmış, diğer balata bileşenleri ise tüm numunelerde aynı oranda sabit tutulmuştur. Dolgu malzemesi olarak kevlar, vermikülit, barit ve bronz kullanılmıştır. Balata numuneleri 4 seri halinde üretilmiştir. Balata üretiminde kullanılan bileşenler ve bu bileşenlerin hacimsel oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmanın 1. aşamasında üretilen numune bileşenleri ve hacimsel oranları

Gruplar	Numuneler	Kompozisyon (% hacimsel olarak)				Reçine	Elyaf	Dolgu
		Yağlayıcı h-BN	grafit	Aşındırıcı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>4</sub> C			
AB	A0	0	0	10,5	0	25	22	42,5
	AB3	3,5	0	7	0			
	AB5	5	0	5,5	0			
	AB7	7	0	3,5	0			
	B10	10,5	0	0	0			
AG	A0	0	0	10,5	0	25	22	42,5
	AG3	0	3,5	7	0			
	AG5	0	5	5,5	0			
	AG7	0	7	3,5	0			
	G10	0	10,5	0	0			
BB	B0	0	0	0	10,5	25	22	42,5
	BB3	3,5	0	0	7			
	BB5	5	0	0	5,5			
	BB7	7	0	0	3,5			
	B10	10,5	0	0	0			
BG	B0	0	0	0	10,5	25	22	42,5
	BG3	0	3,5	0	7			
	BG5	0	5	0	5,5			
	BG7	0	7	0	3,5			
	G10	0	10,5	0	0			

### 2.2.2. Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Üretimi

Çalışmanın 2. aşamasında incelenen numunelerde aşındırıcı tane boyutu değişken olarak alınmış, diğer balata bileşenleri ise tüm numunelerde aynı oranda sabit tutulmuştur. Kullanılan aşındırıcıların ortalama tane boyutları ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Balata üretiminde kullanılan bileşenler ve bu bileşenlerin hacimsel oranları Tablo 3’de verilmiştir. 2. Aşamada üretilen numunelerde barit yerine kalsiyum karbonat kullanılmıştır. 3 grup halinde üretilen numunelerin A grubu numunelerinde aşındırıcı olarak iki farklı tane boyutuna sahip alüminyum oksit, S grubu numunelerinde iki farklı tane boyutuna sahip silisyum karbür ve B grubu numunelerinde üç farklı tane boyutuna sahip bor karbür kullanılmıştır. A25 numunesinin üretiminde (-25/0  $\mu\text{m}$ ) elek aralığındaki alüminyum oksit tozları, A63 numunesinin üretiminde (-63/+45  $\mu\text{m}$ ) elek aralığındaki alüminyum oksit tozları kullanılmıştır. S63 numunesinin üretiminde (-63/+45  $\mu\text{m}$ ) elek aralığındaki silisyum karbür tozları, S90 numunesinin üretiminde (-90/+63  $\mu\text{m}$ ) elek aralığındaki silisyum karbür tozları kullanılmıştır. B25 numunesinin üretiminde (-25/0  $\mu\text{m}$ ) elek aralığındaki bor karbür tozları, B90 numunesinin üretiminde (-90/+63  $\mu\text{m}$ ) elek aralığındaki bor karbür tozları ve B180 numunesinin üretiminde (-180/+125  $\mu\text{m}$ ) elek aralığındaki bor karbür tozları kullanılmıştır.

Tablo 2. Kullanılan aşındırıcıların özellikleri

	Elek aralığı ( $\mu\text{m}$ )	Tane boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Mohs Sertliği	Kırılma tokluğu ( $\text{MPa m}^{1/2}$ )
$\text{Al}_2\text{O}_3$	(-25/0)	23	9	3,5
	(-63/+45)	60		
SiC	(-63/+45)	53	9,5	6
	(-90/+63)	85		
$\text{B}_4\text{C}$	(-25/0)	22	9,5	2,9 - 3,7
	(-90/+63)	85		
	(-180/+125)	145		

Tablo 3. Çalışmanın 2. aşamasında üretilen numune bileşenleri ve hacimsel oranları

		Kompozisyon (% hacimsel olarak)						
Gruplar	Numuneler	Yağlayıcı		Aşındırıcı		Reçine	Elyaf	Dolgu M.
		h-BN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	B <sub>4</sub> C			
A (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	A25	5	5			25	27	38
	A63	5	5			25	27	38
S (SiC)	S63	5		5		25	27	38
	S90	5		5		25	27	38
B (B <sub>4</sub> C)	B25	5			5	25	27	38
	B90	5			5	25	27	38
	B180	5			5	25	27	38

### 2.3. Numunelere Uygulanan Mekanik Testler

#### 2.3.1. Sertlik Ölçümü

Sertlik ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Ölçümlerde Rockwell- M skalaları kullanıldı. Rockwell- M ölçümünde ön yük 10 kg ve büyük yük 100 kg olarak seçildi. Batıcı uç olarak 6,35 mm çapında sertleştirilmiş çelik bilya kullanıldı. Sertlik ölçümlerinde 25x25x10 mm boyutlarında numune kullanıldı. Her balata numunesinin alt ve üst yüzeylerinde sertlik ölçümleri yapılarak, 5 ölçümün ortalaması alınıp sertlik değerleri tespit edildi.

#### 2.3.2. Çekme Dayanımı Ölçümü

Numunelerin çekme dayanımları Instron 3382 marka universal test cihazı ile oda sıcaklığında ölçülmüştür.

#### 2.3.3. Eğilme Dayanımı Ölçümü

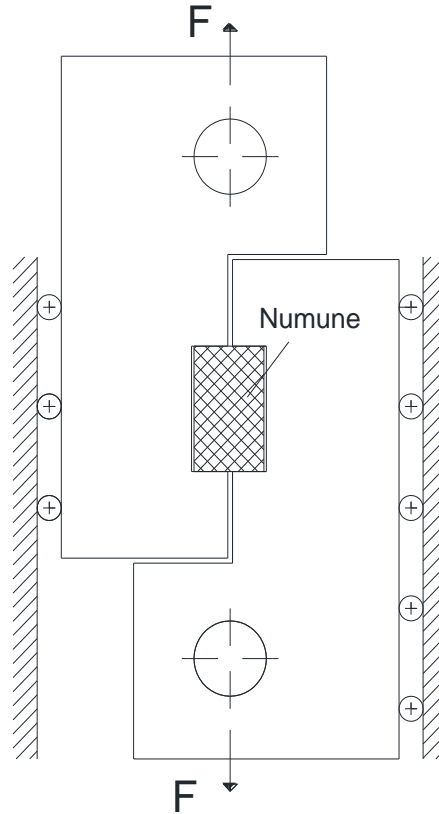
Numunelerin eğilme dayanımları Instron marka universal test cihazı ile oda sıcaklığında yapıldı. 10x55x10 mm boyutlarında üretilen numuneler 3 nokta eğilme testine tabi tutuldu ve eğilme dayanımları belirlendi.

### 2.3.4. Kesme Dayanımı Ölçümü

Numunelerin kesme dayanımları, özel olarak hazırlanmış bir aparatla üniversal çekme makinası kullanılarak belirlendi (Şekil 14). Numuneye 5 mm/dk sabit çene hızında gerilme yönüne paralel olacak şekilde devamlı artan yük uygulandı. Deneye kırılma meydana gelene kadar devam edildi. Kesme dayanımı ölçümleri standartlara uygun 25x25x10 mm boyutlarında numune kullanılarak yapıldı ve aşağıdaki formülle hesaplandı.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Burada  $\tau$  kesme dayanımı (MPa), F kesme kuvveti (N) ve A kesmeye maruz kalan kesit alanı (mm<sup>2</sup>)' dir.



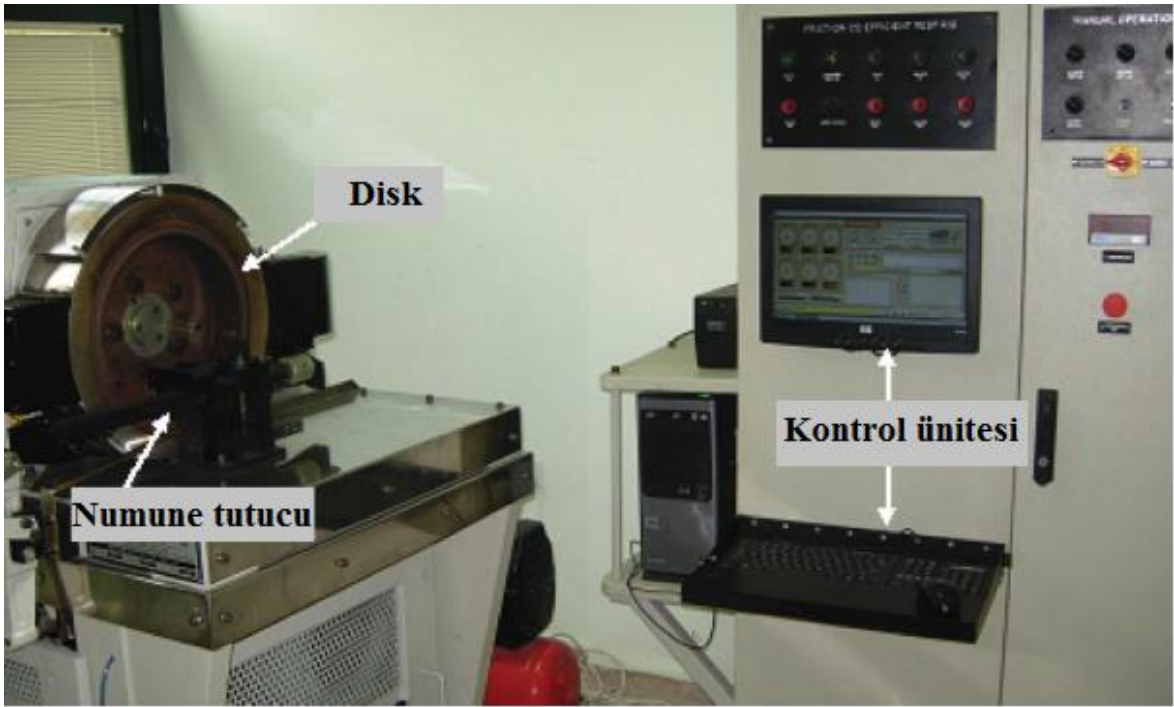
Şekil 13. Kesme dayanımı ölçüm aparatının teknik resmi

### 2.3.5. Darbe Dayanımı Ölçümü

Numunelerin Charpy darbe dayanımlarının belirlenmesi oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Numuneler 10x55x10 mm boyutlarında ve çentiksiz olarak üretildi. Numunelerin darbe dayanımları kırılma enerjisinin numune alanına bölünmesi ile hesaplandı.

### 2.4. Sürtünme ve Aşınma Test Cihazı ve Test Şartları

Sürtünme performans deneyleri SAE J661 standardına uygun olarak Chase tipi test cihazında gerçekleştirildi. Test cihazı Şekil 14' de verilmiştir. Cihaz numune tutucu, tambur ve kontrol ünitesi olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Sürtünme deneylerinde kullanılan numune boyutu 25x25x7 mm' dir. Sürtünme performans deneyleri Tablo 4' de verilen test şartlarında yapılmıştır.



Şekil 14. Sürtünme test düzeneği (Chase tipi)

Tablo 4. Test şartları

Blok	Hız (devir/dk)	Sıcaklık (°C)			Yük (N)	Sürtünme		Bekleme		Uygulama sayısı
		Min.	Mak.	Artış		Dak.	Sn.	Dak.	Sn.	
Yanma	308	-	93	-	450	20	-	-	-	1
Düzenleme	205	82	93	-	230	5	-	-	-	1
I-Alıştırma	411	82	104	-	670	-	10	-	20	20
I-Yorma	411	82	289	28	670	10	-	-	-	1
I-Toparlama	411	261	93	56	670	-	10	-	-	1
Aşınma	411	193	204	-	670	-	20	-	10	100
II-Yorma	411	82	345	28	670	10	-	-	-	1
II-Toparlama	411	317	93	56	670	-	10	-	-	1
II-Alıştırma	411	82	104	-	670	-	10	-	20	20

Sürtünme deneyleri yanma, düzenleme, birinci alıştırma, birinci yorma, birinci toparlama, aşınma, ikinci yorma, ikinci toparlama ve ikinci alıştırma kısımlarından oluşmaktadır. Özgül aşınma miktarı, birim sürtünme işi başına aşınan balata hacmi olup aşağıdaki formülle bulunmuştur [35].

$$\dot{W}_s = \frac{\Delta m}{L \cdot \rho \cdot F_n} \quad (2)$$

Burada  $\dot{W}_s$  özgül aşınma miktarı ( $\text{mm}^3/\text{N.m}$ ),  $\Delta m$  numune ağırlık kaybı (aşınma deneyinden önce ve sonra numunedeki ağırlık kaybı, g), L kat edilen toplam yol (m),  $\rho$  numune yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ ),  $F_n$  ise uygulanan yüküdür (N).

Numune aşınma yüzeyleri ve aşınma parçacıkları ZEISS marka taramalı elektron mikroskopunda, aşınma parçacık boyutu ise Malvern Mastersizer 2000 cihazı kullanarak tespit edildi.

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Numunelerin Mekanik Özellikleri İle İlgili Bulgular

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen numunelerin sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, iç kesme dayanımı ve darbe dayanımları ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5’ de verilmiştir.

Tablo 5. Numunelerin bazı mekanik özellik değerleri

Gruplar	Numuneler	Sertlik HRM	Çekme Mukavemeti MPa	Eğilme Mukavemeti MPa	Kesme Mukavemeti MPa	Darbe Direnci J/cm <sup>2</sup>
AB	A0	89,55	32,06	62,49	7,37	0,40
	AB3	86,64	26,54	65,16	6,28	0,40
	AB5	84,63	29,36	62,80	5,55	0,36
	AB7	86,25	24,41	69,66	6,68	0,36
	B10	90,48	31,25	79,35	6,86	0,36
AG	A0	89,55	32,06	62,49	7,37	0,40
	AG3	86,62	28,14	59,97	5,12	0,35
	AG5	80,32	20,91	60,54	5,22	0,35
	AG7	79,64	25,03	62,43	6,27	0,34
	G10	74,61	27,94	73,43	5,24	0,37
BB	B0	96,52	32,42	62,92	7,52	0,39
	BB3	90,24	27,55	62,98	7,08	0,40
	BB5	88,22	24,80	60,39	5,74	0,36
	BB7	87,60	32,42	63,68	5,53	0,38
	B10	90,48	31,25	79,35	6,86	0,36
BG	B0	96,52	32,42	62,92	7,52	0,39
	BG3	89,92	28,74	67,41	6,08	0,39
	BG5	87,12	27,09	65,02	5,50	0,38
	BG7	86,13	26,83	66,94	5,29	0,38
	G10	74,61	27,94	73,43	5,24	0,37



## **3.2. Numunelerin Tribolojik Özellikleri ile İlgili Bulgular**

### **3.2.1. Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları ile İlgili Bulgular**

Çalışmanın birinci kısmında farklı tip ve oranlardaki katı yağlayıcı ve aşındırıcıların numunelerin sürtünme ve aşınma özellikleri üzerine etkilerini incelemek amacıyla SAE J661 standardına göre testler yapılmıştır. Testler sonucunda sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi, sürtünme katsayısının frenleme sayısı ile değişimi, özgül aşınma miktarları tespit edilmiştir. Ayrıca aşınmış numune yüzeylerinin ve aşınma parçacıklarının SEM ve EDS analizleri sonucunda aşınma mekanizmaları hakkında bilgiler elde edilmiştir.

#### **3.2.1.1. Disk Sıcaklığı ve Frenleme Sayısının Sürtünme Katsayısına Etkileri ile İlgili Bulgular**

Sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi, ortalama sürtünme katsayısı ve sürtünme katsayısının frenleme sayısı ile değişimlerini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. SAE J661 standardına uygun yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 15-26'da verilmiştir. Şekil 15-18' de sabit kayma koşullarında( hız:411 d/dk, yük:670 N) sırasıyla AB, AG, BB ve BG numuneleri için sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.

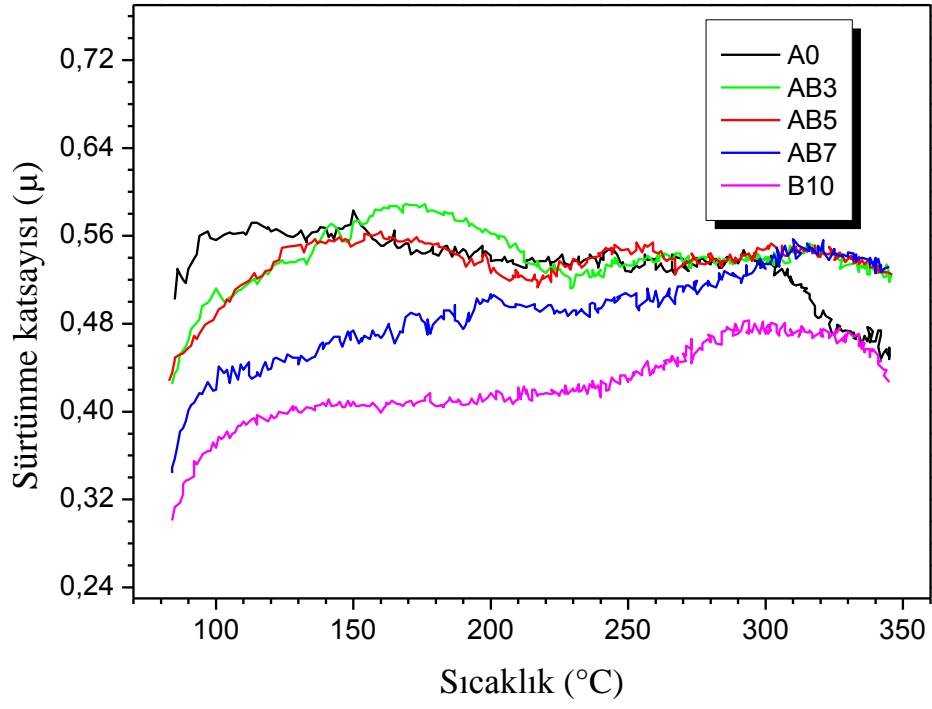
Şekil 15' de görüldüğü gibi bütün numunelerin sürtünme katsayıları deney başlangıcından yaklaşık 300 °C disk sıcaklığına kadar artış göstermiştir. Sıcaklığın daha fazla artması bileşiminde yağlayıcı içermeyen ve % 10,5 alüminyum oksit içeren A0 numunesinin sürtünme katsayısının keskin bir şekilde düşmesine neden olmuştur. Bileşiminde aşındırıcı bulunmayan ve %10,5 h-BN içeren B10 numunesinde ise sürtünme katsayısı 300 °C disk sıcaklığına kadar sürekli artmış, 300-340 °C sıcaklıkları arasında önemsenmeyecek bir düşme görülmüş ve 340 °C disk sıcaklığına ulaşıldığında ani bir şekilde düşmüştür. AB3 ve AB5 numuneleri test süresince benzer davranış göstermiş, sürtünme katsayıları yüksek sıcaklıklarda çok az düşmüştür. AB grubu numunelerinde yalnız A0 numunesinin sürtünme katsayısı yüksek sıcaklıkta düşmüş ve feyd görülmüştür. Diğer numunelerde feyd görülmemiştir.

AG grubu numunelerinin sürtünme katsayıları 150 °C disk sıcaklığına kadar ani bir artış göstermiştir. 150-300 °C disk sıcaklığı aralığında G10 numunesi hariç diğer tüm

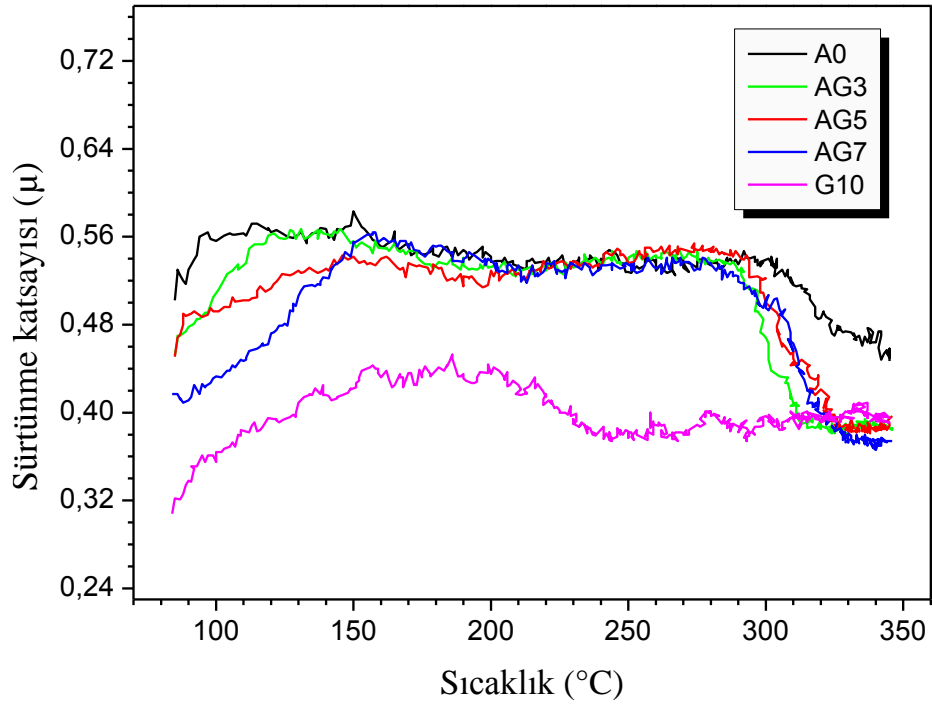
numuneler neredeyse sabit bir sürtünme katsayısına sahipken disk sıcaklığı 300 °C'yi geçer geçmez sürtünme katsayılarında çok ani düşüş görülmüştür. Öte yandan, bileşiminde aşındırıcı içermeyen ve % 10 grafit içeren G10 numunesinin sürtünme katsayısı 180 °C'ye kadar artmış, 180-240 °C disk sıcaklığı arasında az bir düşüş göstermiş ve bu sıcaklıktan sonra sabit kalmıştır ( Şekil 16). A0, AG3, AG5 ve AG7 numunelerinin 150-300 °C arasında benzer sürtünme katsayısı sonuçları vermiştir. AG grubu numunelerinin G10 numunesi hariç tüm numunelerde feyd görülmüştür.

BB grubu numunelerinden BB3, BB5 ve BB7 numunelerinin sürtünme katsayıları test başlangıcından 100 °C disk sıcaklığına kadar artmış ve yaklaşık 200 °C disk sıcaklığına kadar çok az düşüş göstermiştir, 200 °C disk sıcaklığından sonra ise her 3 numunenin de sürtünme katsayıları artan sıcaklıkla birlikte önemli artış göstermiştir. Sadece BB3 numunesinde 300 °C disk sıcaklığından sonra feyd görülmüştür. Bileşiminde yağlayıcı bulunmayan ve % 10,5 B<sub>4</sub>C içeren B0 numunesinin sürtünme katsayısı artan disk sıcaklığı ile 180 °C' ye kadar artmış ve bu sıcaklıktan sonra test sonuna kadar sürekli düşmüştür. BB grubu numunelerinden yalnızca B0 numunesinde önemli derecede feyd görülmüştür, diğer numunelerde çok yüksek sıcaklıklarda düşük seviyede feyd gözlemlenmiştir (Şekil 17).

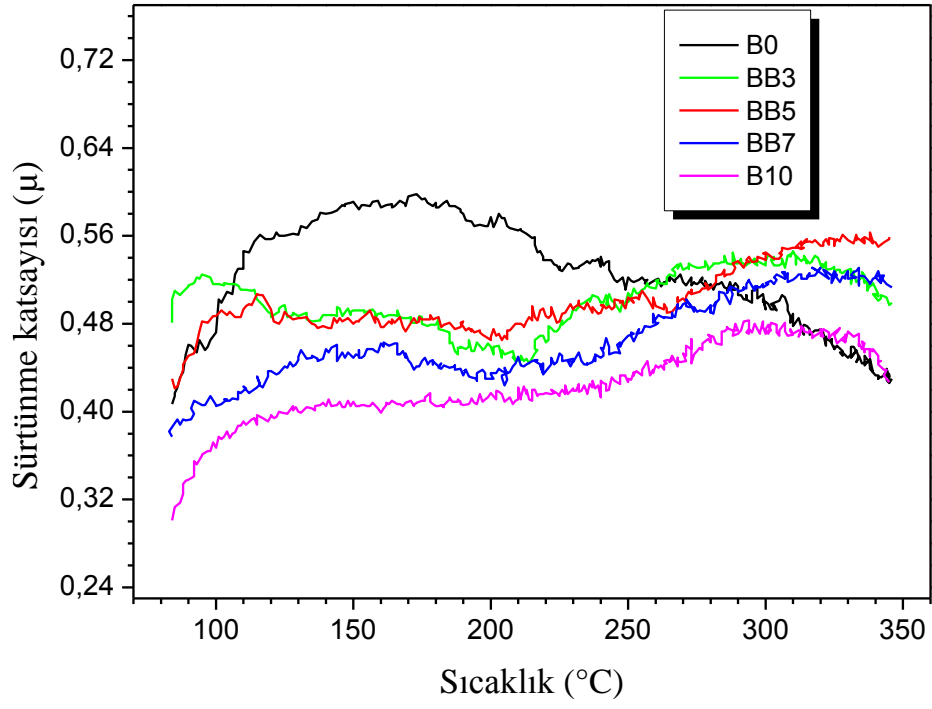
Şekil 18' de görüldüğü gibi bütün BG grubu numunelerinin sürtünme katsayısı değerleri yaklaşık 190 °C disk sıcaklığına kadar yükselmiş ve daha sonra test sonuna kadar sürekli azalmıştır. Bu grupta G10 numunesi hariç tüm numunelerde önemli derecede feyd görülmüştür.



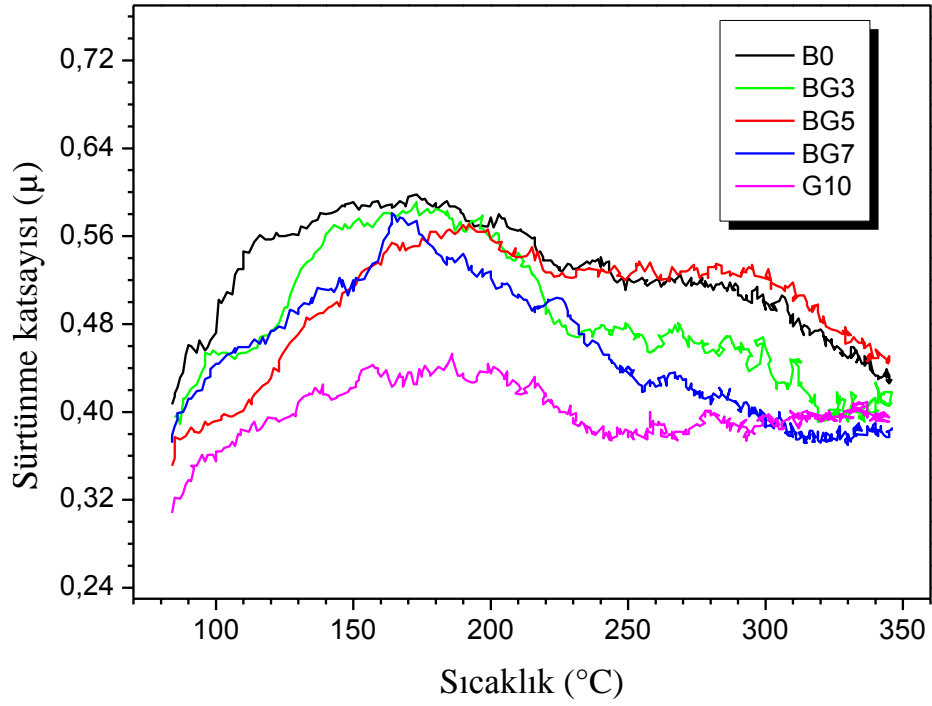
Şekil 15. AB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi



Şekil 16. AG grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi



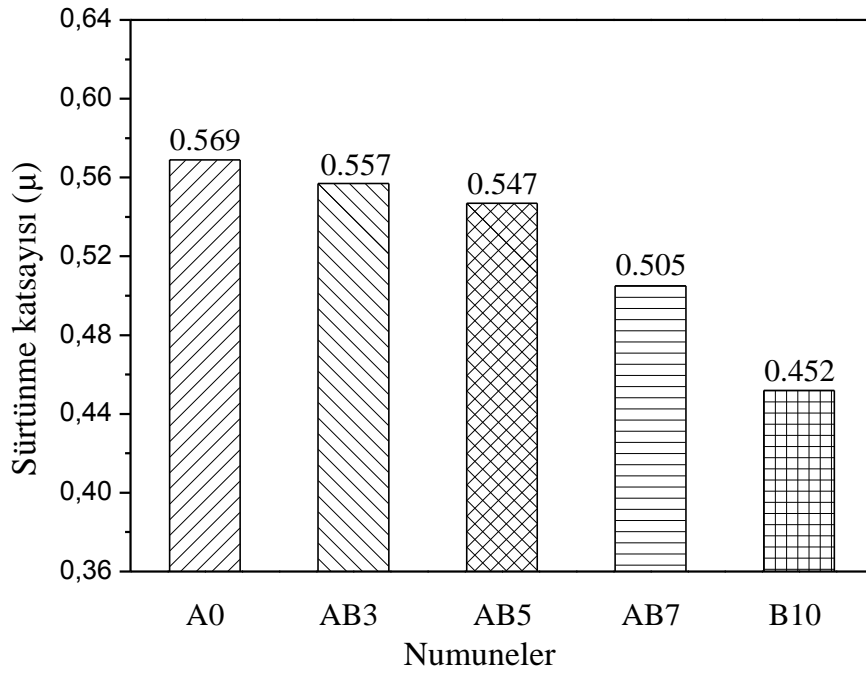
Şekil 17. BB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi



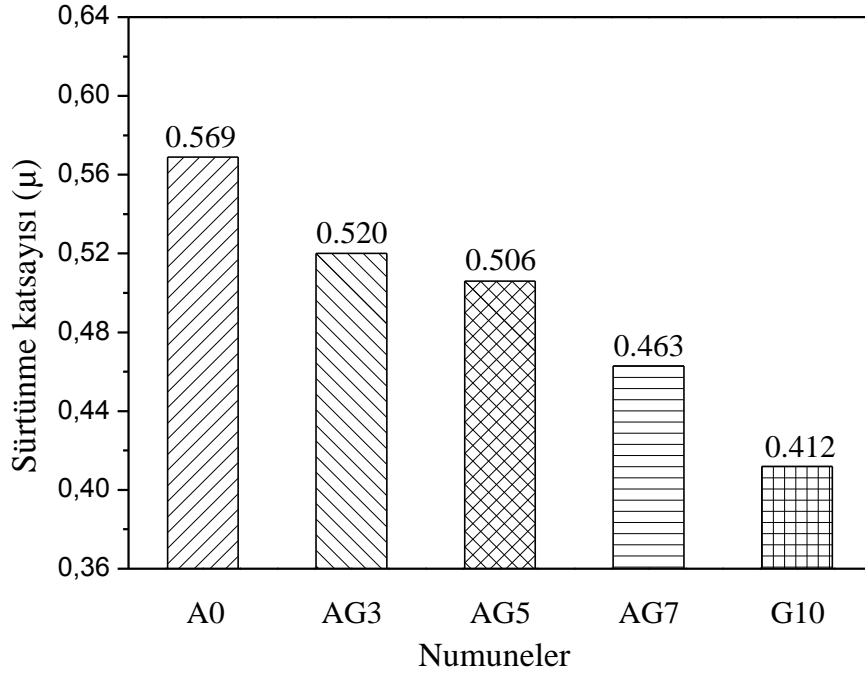
Şekil 18. BG grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi

AB, AG, BB ve BG grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla Şekil 19-22 'de gösterilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı, 1. toparlanma aşamasında 204 ve 149 °C, 2. feyd aşamasında 232, 260, 288, 316, ve 343 °C'de ve 2. toparlanma aşamasında 260, 204, ve 149 °C'de bulunan 10 noktaya ait sürtünme katsayısı değerlerinin ortalamasının alınması ile hesaplanır [35].

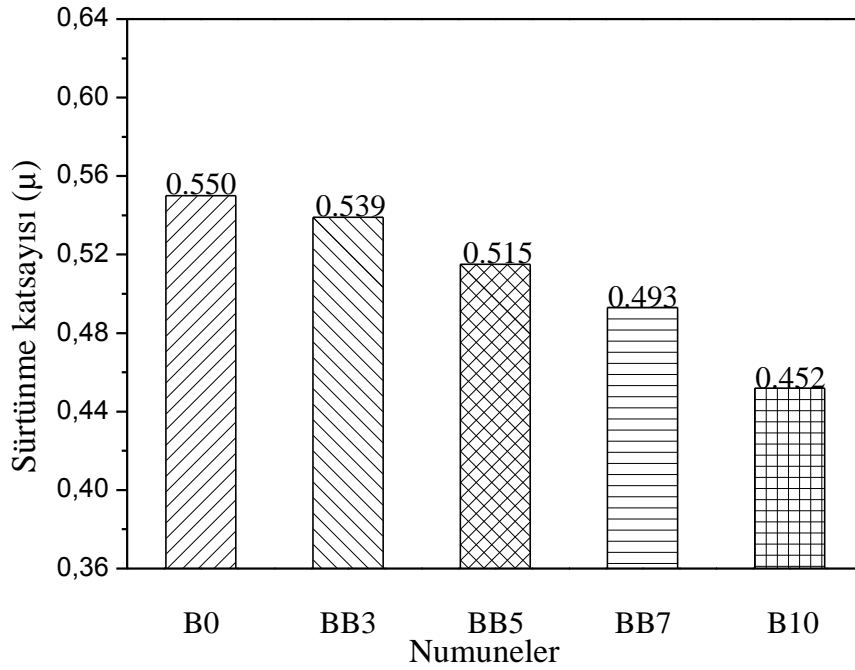
Ortalama sürtünme katsayısı değeri tüm numune gruplarında artan yağlayıcı miktarı ve azalan aşındırıcı miktarı ile dşmştir. Fakat BG grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerinde bir uyum gözlenmemiştir. Eşit miktarda katı yağlayıcı ve aşındırıcı kullanıldığında en yüksek ve en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerleri AB ve BG grubu numunelerinde kaydedilmiştir. Şekil 20-23 aynı zamanda, h-BN içeren AB ve BB grubu numunelerinin ortalama sürtünme katsayılarının grafit içeren AG ve BG grubu numunelerinin ortalama sürtünme katsayılarından daha yüksek olduğunu göstermiştir.



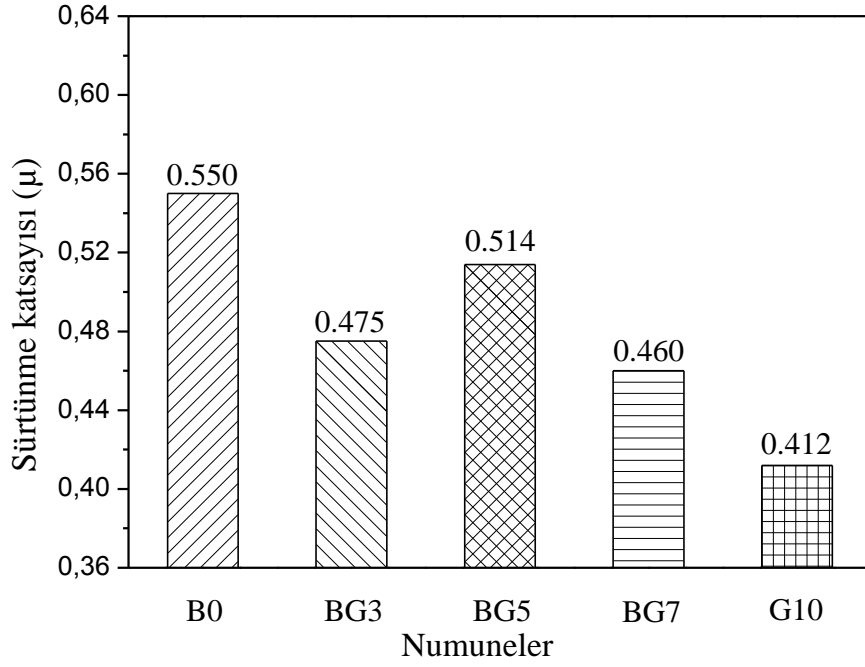
Şekil 19. AB grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları



Şekil 20. AG grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

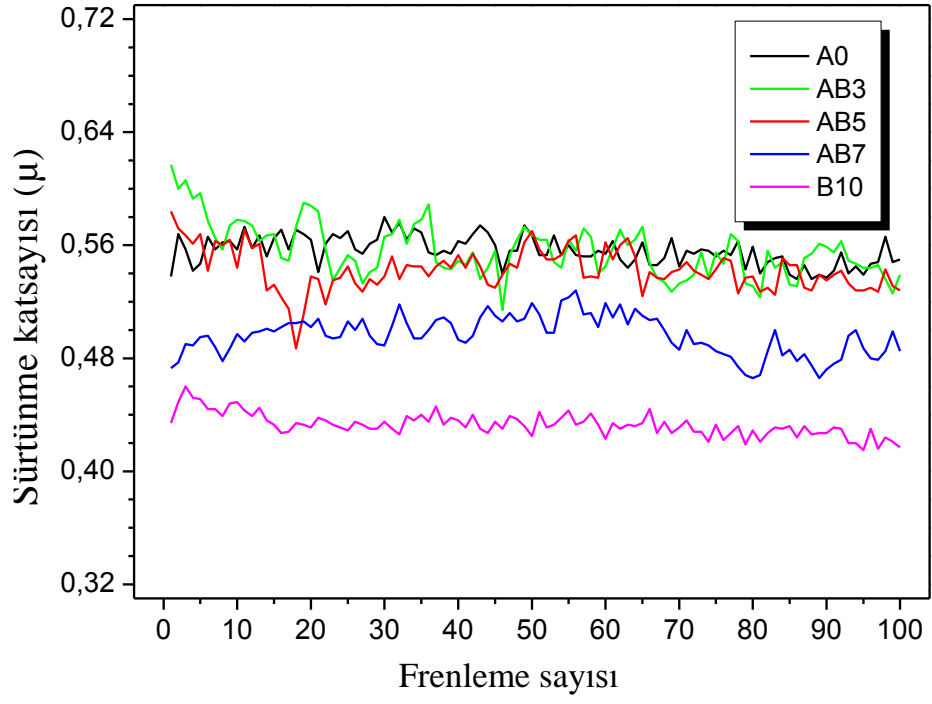


Şekil 21. BB grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

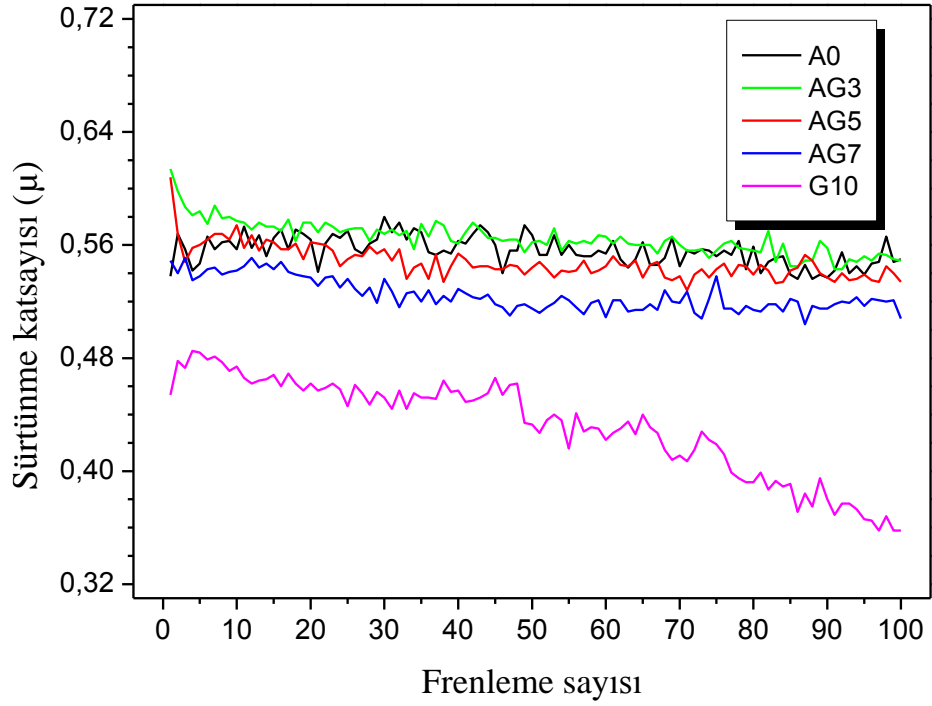


Şekil 22. BG grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

Şekil 23-26'da numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi gösterilmektedir. AB grubu numunelerinin sürtünme katsayıları artan frenleme sayısı ile belirgin bir değişim göstermemiş ve nispeten sabit kalmıştır (Şekil 23). Benzer sonuçlar G10 numunesi hariç AG grubu numunelerinde de gözlenmiştir. G10 numunesinin sürtünme katsayısı artan frenleme sayısı ile keskin bir şekilde düşmüş ve deney süresince düşmeye devam etmiştir (Şekil 24). BB grubu numunelerin sürtünme katsayıları deney başlangıcında düşmüş ve daha sonra artan frenleme sayısı ile sabit kalmıştır (Şekil 25). BG grubu numunelerin sürtünme katsayıları ise artan frenleme sayısı ile sürekli olarak düşmüştür (Şekil 26).

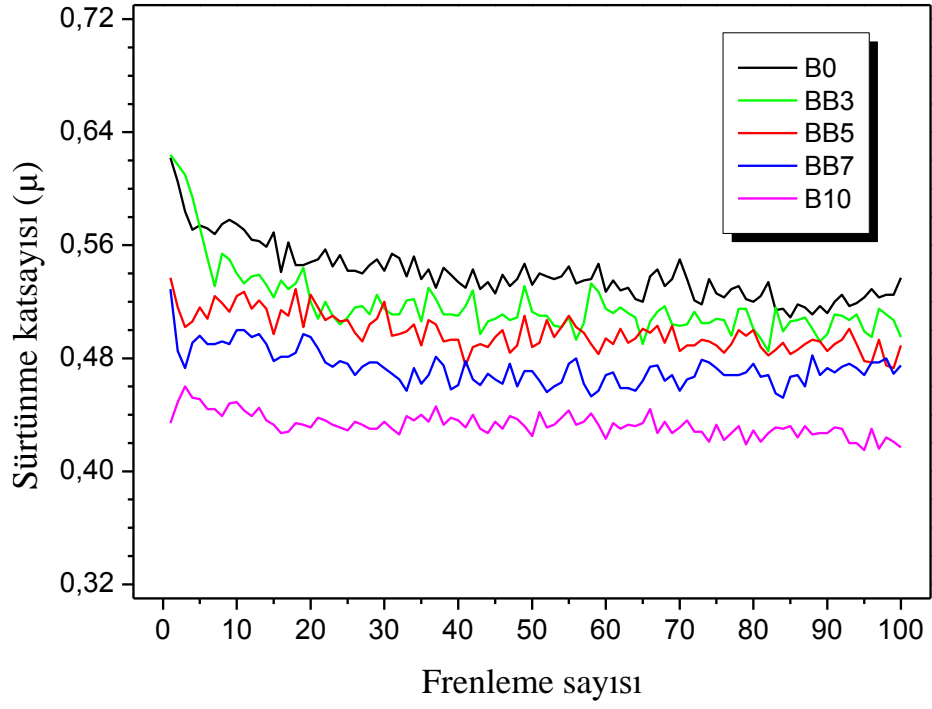


Şekil 23. AB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi

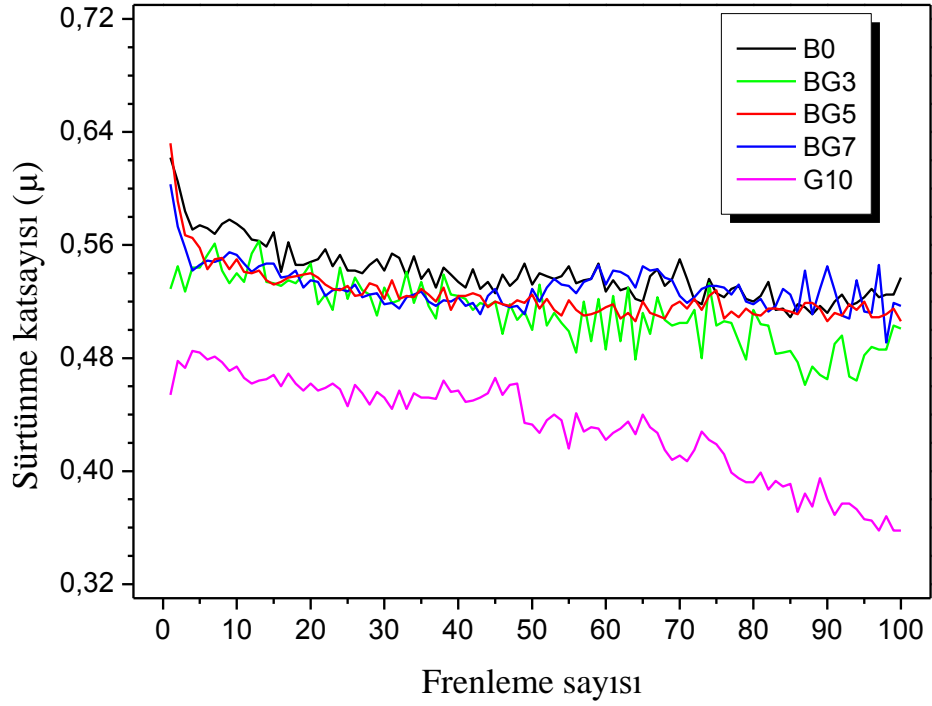


Şekil 24. AG grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi





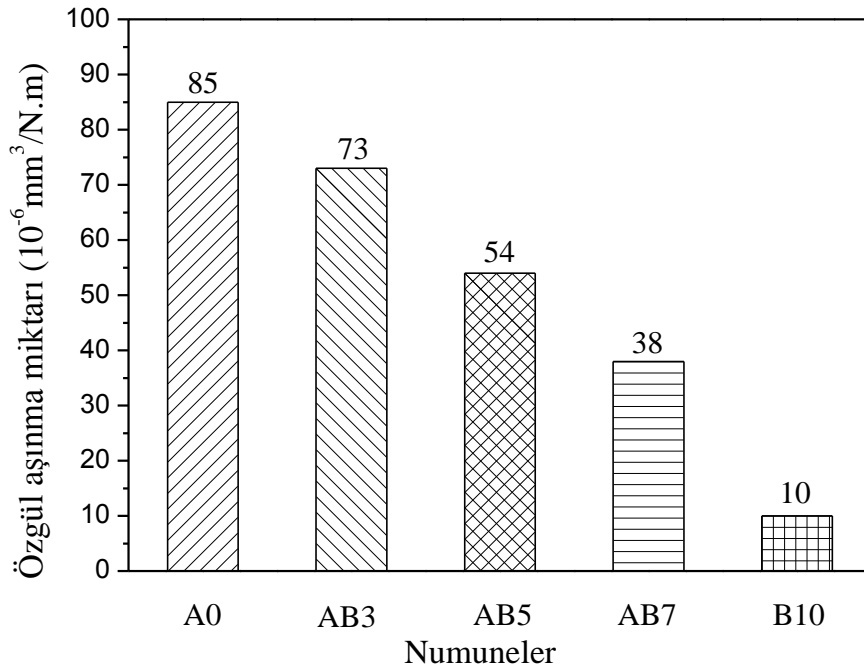
Şekil 25. BB grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi



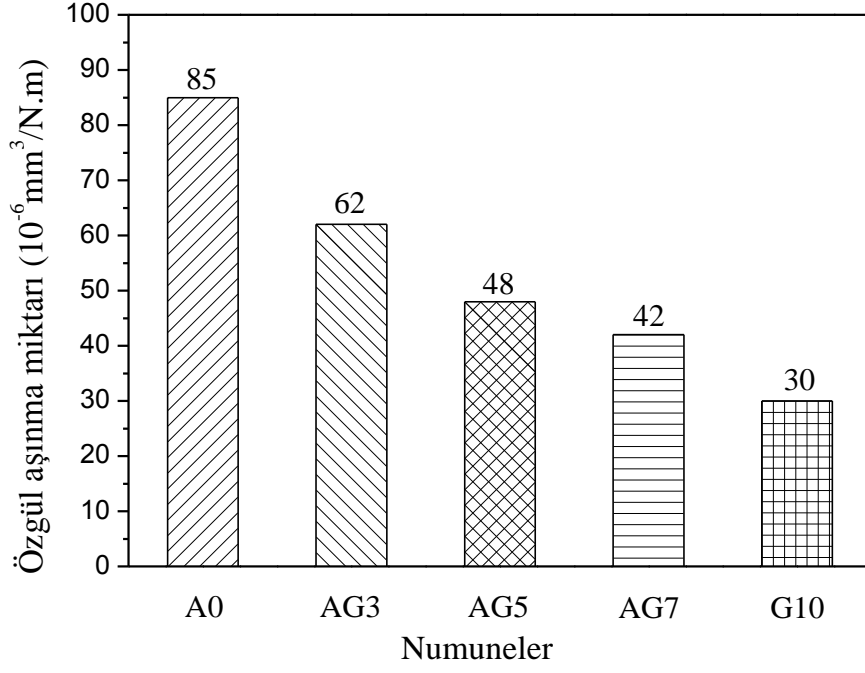
Şekil 26. BG grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi

### 3.2.1.2. Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Özgül Aşınma Miktarları ile İlgili Bulgular

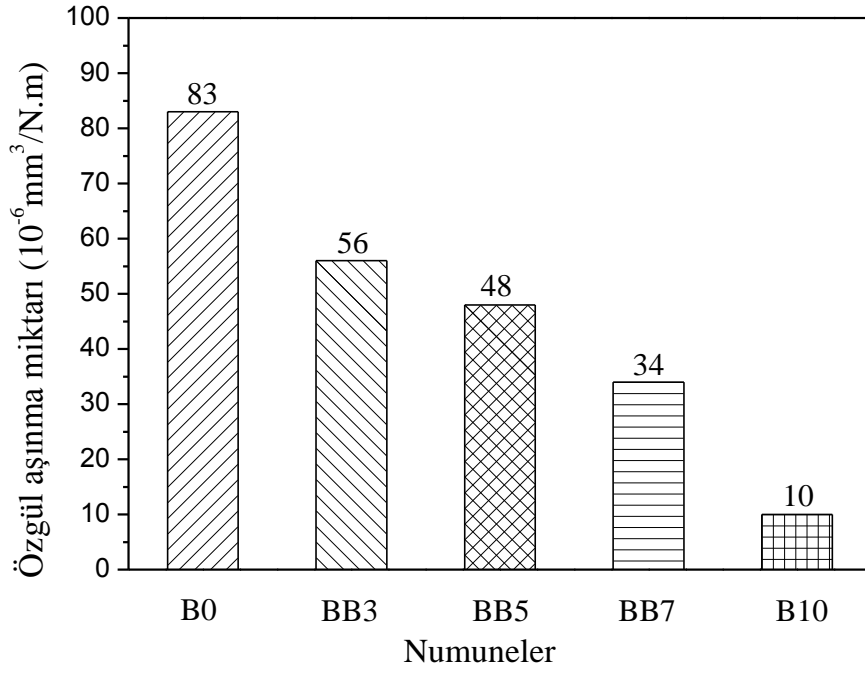
Şekil 27-30' da numunelerin özgül aşınma miktarları verilmiştir. En yüksek özgül aşınma miktarı bileşimlerinde yağlayıcı içermeyen ve % 10,5 alüminyum oksit içeren A0 numunesi ile % 10,5 bor karbür içeren B0 numunesinde gözlemlenmiştir. Bileşiminde katı yağlayıcı içermeyen A0 ve B0 numunelerinin özgül aşınma miktarları neredeyse eşittir. Buna karşılık bileşiminde aşındırıcı içermeyen G10 ve B10 numunelerini karşılaştırdığımızda B10 numunesinin özgül aşınma miktarı G10 numunesinin özgül aşınma miktarından 3 kat daha düşüktür. Tüm gruplarda numunelerin özgül aşınma miktarları artan yağlayıcı miktarı ile azalmış ve artan aşındırıcı miktarı ile artmıştır. Eşit katı yağlayıcı ve aşındırıcı miktarlarında diğer gruplara göre en iyi aşınma direncini BB grubu numuneler göstermiştir.



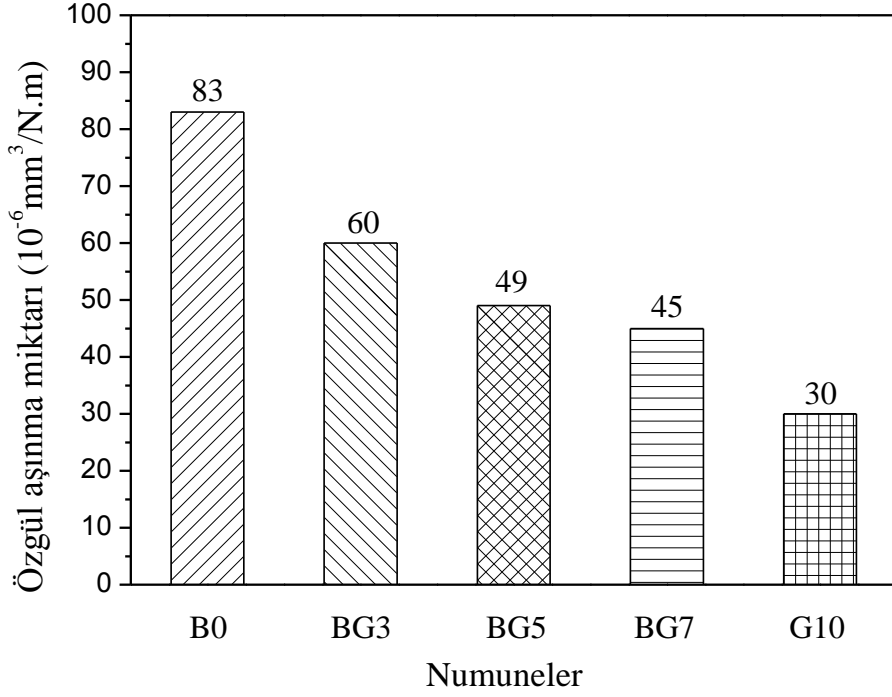
Şekil 27. AB grubu numunelerin özgül aşınma miktarları



Şekil 28. AG grubu numunelerin özgül aşınma miktarları



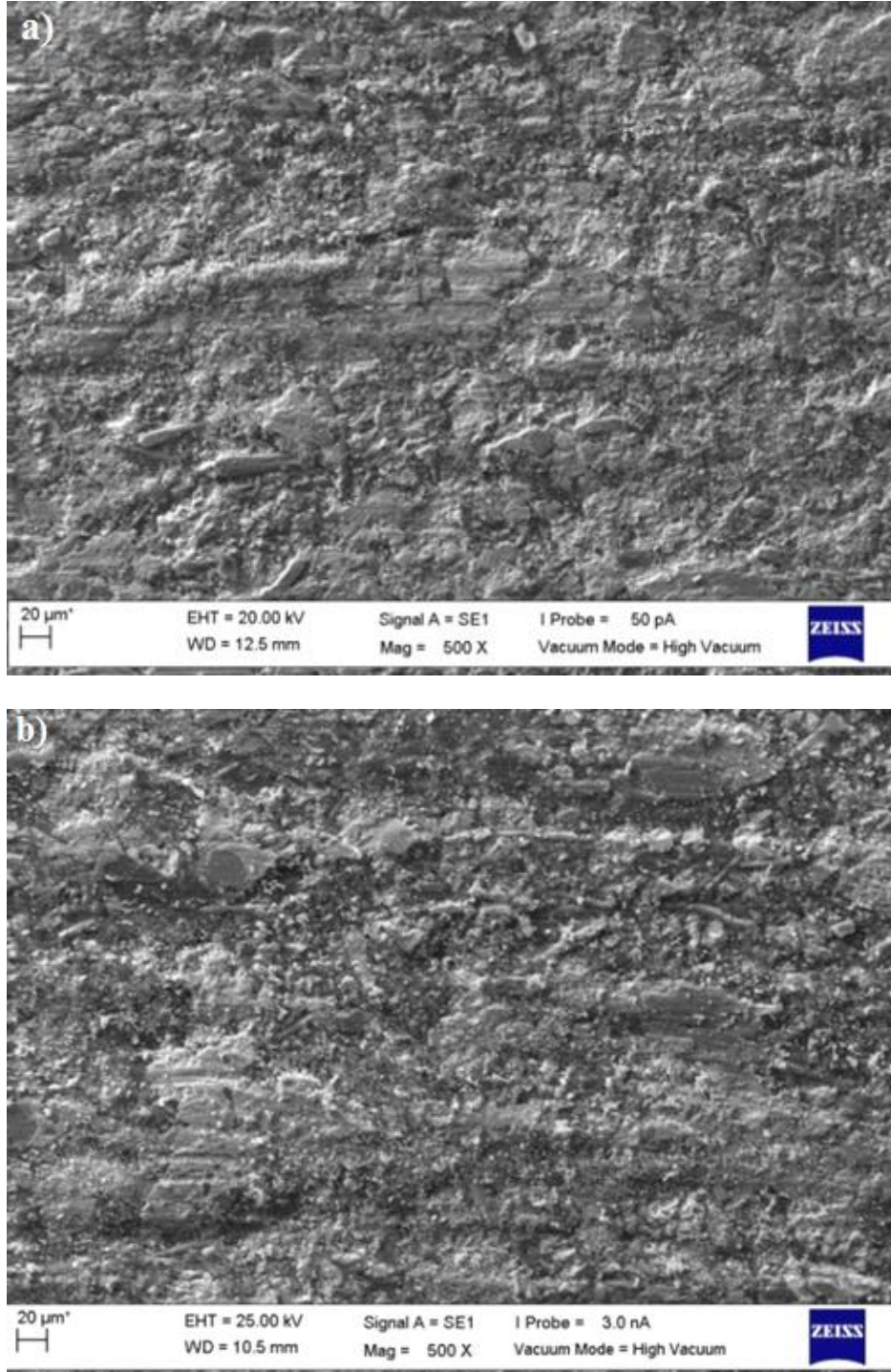
Şekil 29. BB grubu numunelerin özgül aşınma miktarları



Şekil 30. BG grubu numunelerin özgül aşınma miktarları

### 3.2.1.3. Farklı Oranlarda Yağlayıcı ve Aşındırıcı İçeren Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

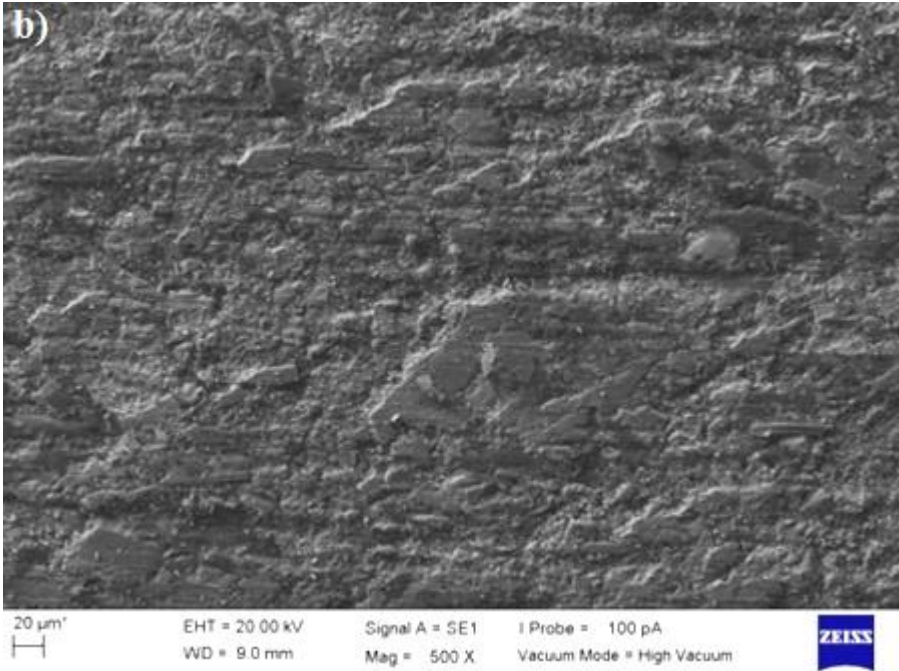
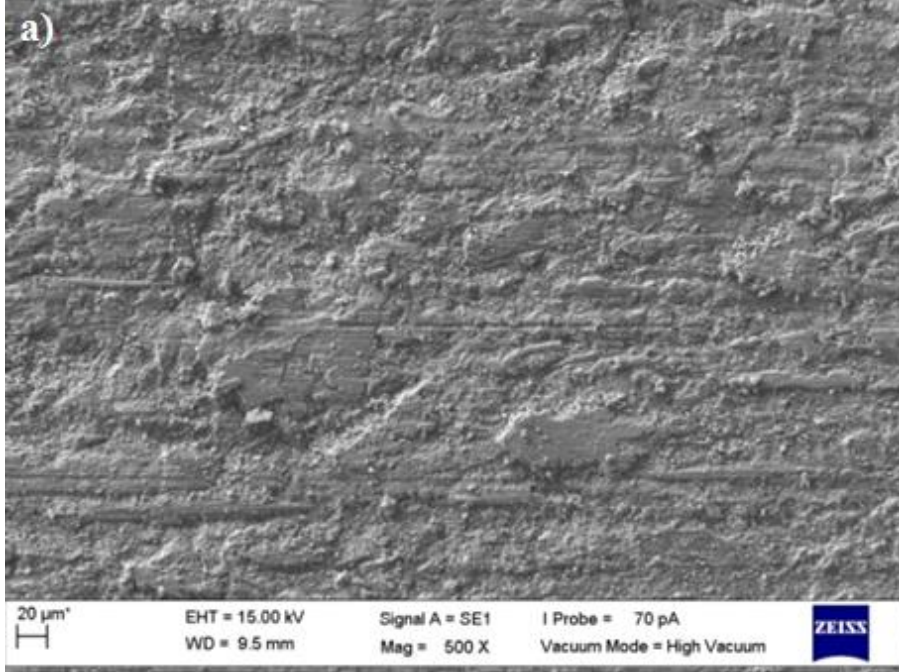
Numunelerin aşınmış yüzeyleri ve aşınma parçacıklarının yüzey özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için SEM analizleri yapılmadan önce ince altın tabaka ile kaplanmıştır. Numune A0 ve B0'nın SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 31 a ve b' de verilmiştir. Görüntülerden de anlaşıldığı gibi iki yüzey arasında belirgin bir fark yoktur. Her iki yüzeyde de aşınmış fakat kopmamış elyaflar, yerinden ayrılmış, kırılmış elyaflar ve yüzeyden tamamen ayrılmış ince toz aşınma parçacıkları görülmektedir.



Şekil 31. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) A0 b) B0 numunesi

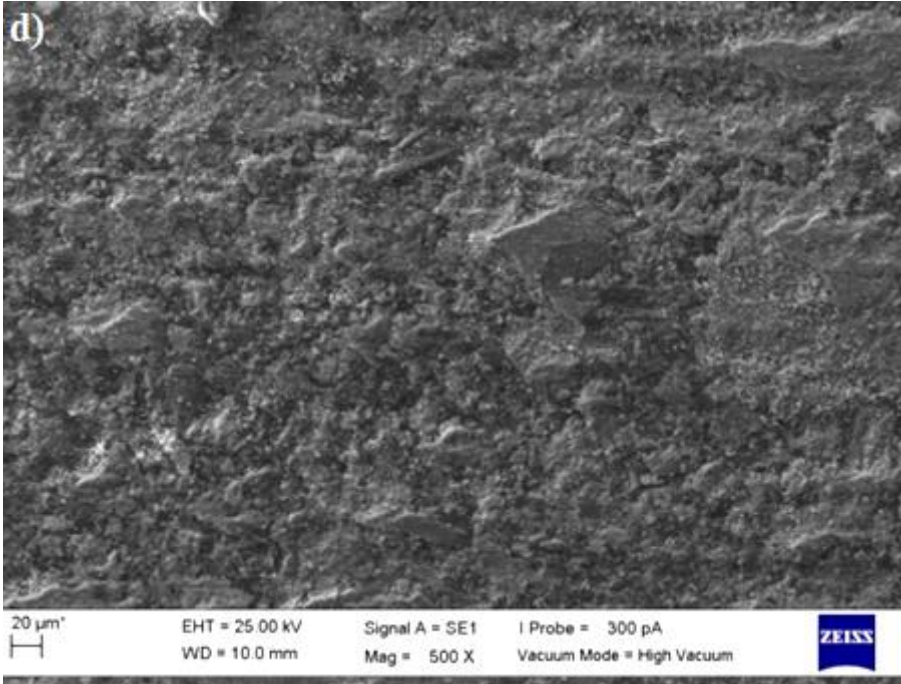
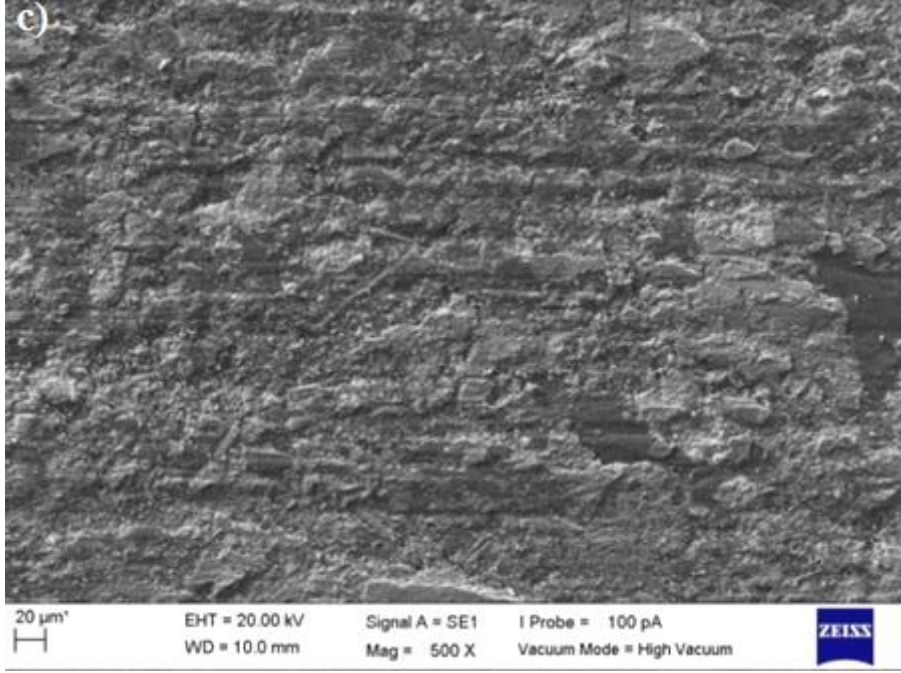
AB5, AG5, BB5 ve BG5 numunelerinin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 32 (a-d)'de verilmiştir. Numune yüzeyleri incelendiğinde aşınmış fakat kopmamış elyaflar, yerinden ayrılmış, kırılmış elyaflar, yüzeyden tamamen ayrılmış ince toz aşınma

parçacıkları ve ikincil temas platoları görülmektedir. Bu numunelerin yüzeylerinde yer alan aşınmış ve kopmamış elyaflar A0 ve B0 numunelerine kıyasla daha azdır.



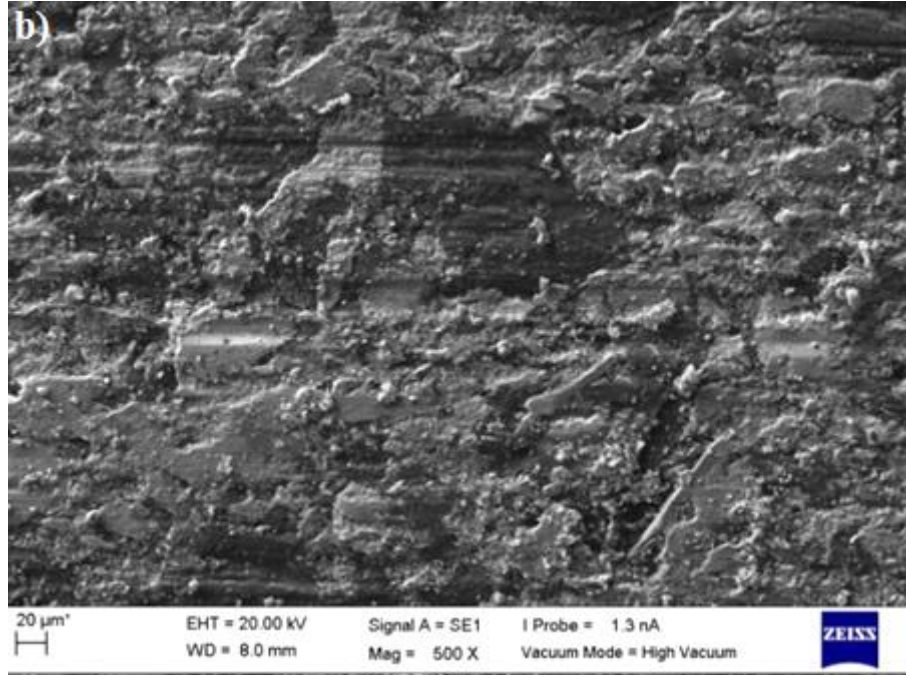
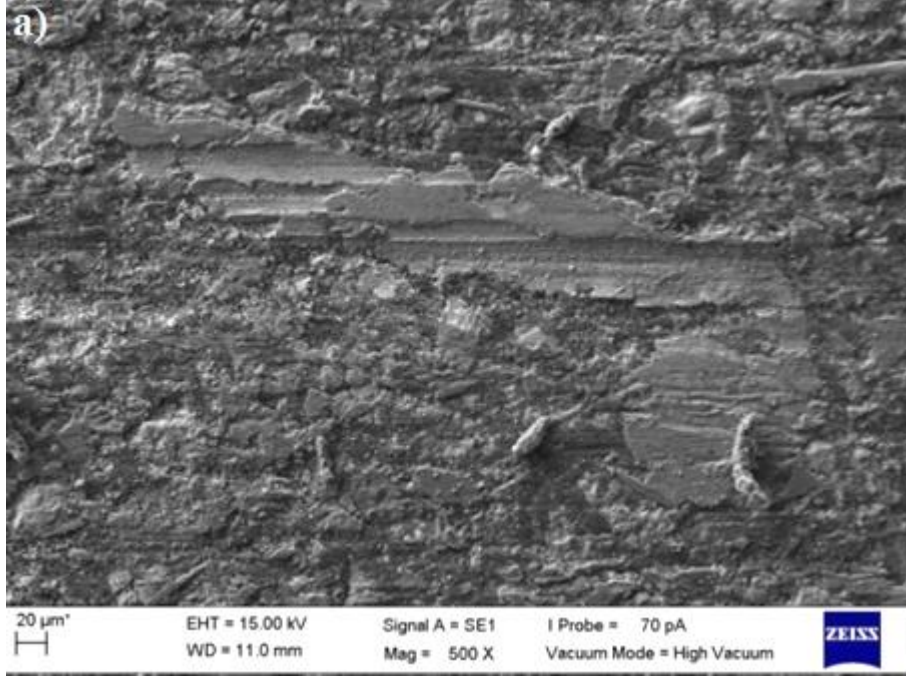


Şekil 32'nin devamı



Şekil 32. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) AB5, b) AG5, c) BB5, d) BG5

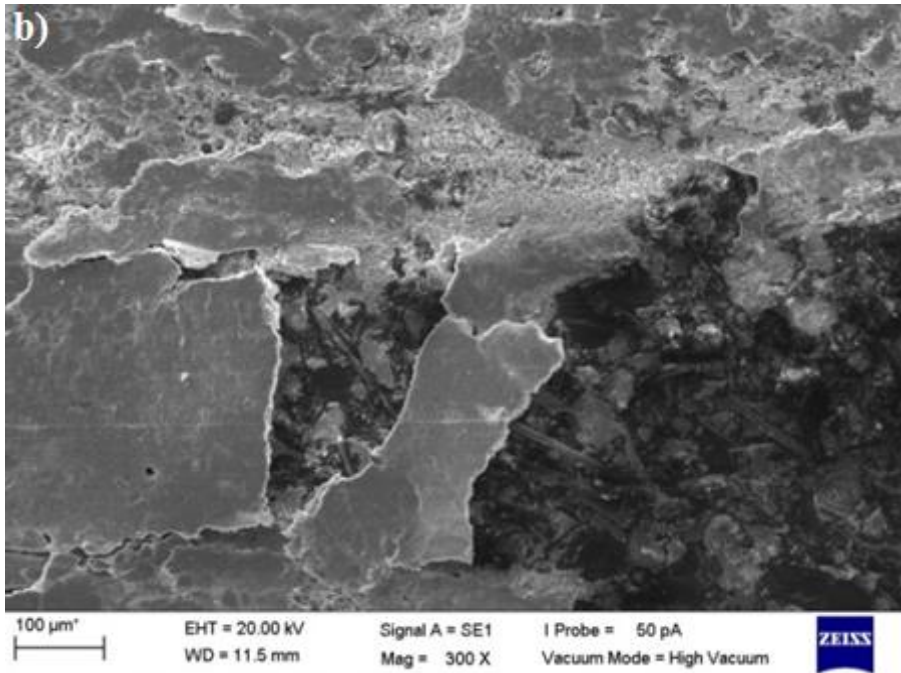
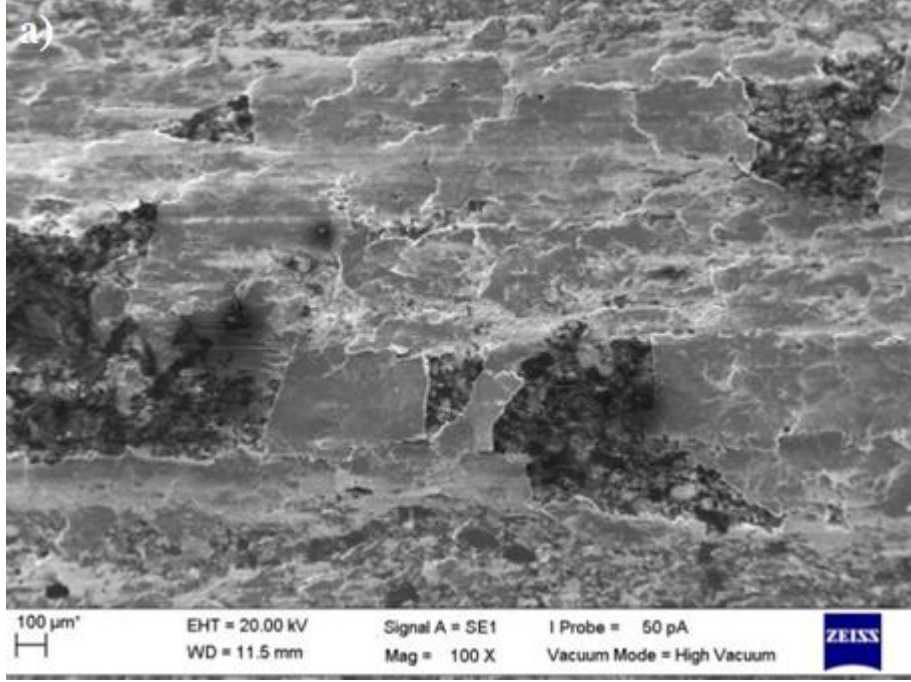
B10 ve G10 numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 33 a ve b' de sırasıyla verilmiştir. Numune yüzeyleri geniş ikincil temas platoları ile kaplıdır. Numune yüzeylerinde az da olsa aşınmış ve yerinden ayrılmış elyaflar bulunmaktadır.



Şekil 33. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) B10 b) G10 numunesi.



Ayrıca Şekil 34' de G10 numunesinin yüzeyinde meydana gelen sürtünme filminin farklı büyütmelelerdeki görüntüleri verilmiştir. Numune yüzeyinde geniş sürtünme filmi ve ikincil temas platoları görülmektedir. Numune yüzeylerinde az da olsa aşınmış ve yerinden ayrılmış elyaflar bulunmaktadır.



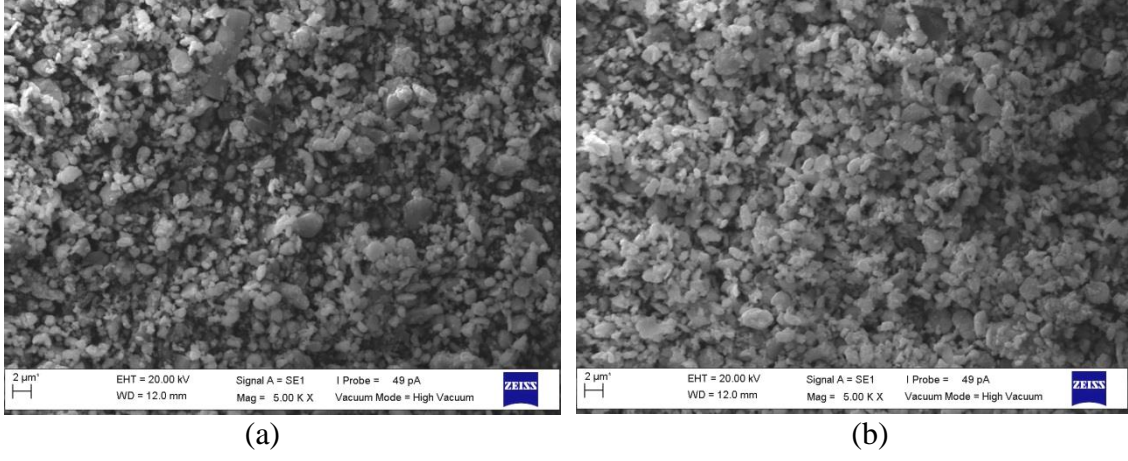
Şekil 34. G10 numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri: a) 100x b) 300x

Tablo 6’da bazı numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS analiz sonuçları verilmiştir. Numunelerin aşınma yüzeylerinde diğer elementlerin yanı sıra temel olarak C, O, Fe ve Ba bulunmaktadır. Numune yüzeylerinde bulunan Fe oranı aşındırıcı oranının artması ve yağlayıcı oranının azalması ile artmıştır.

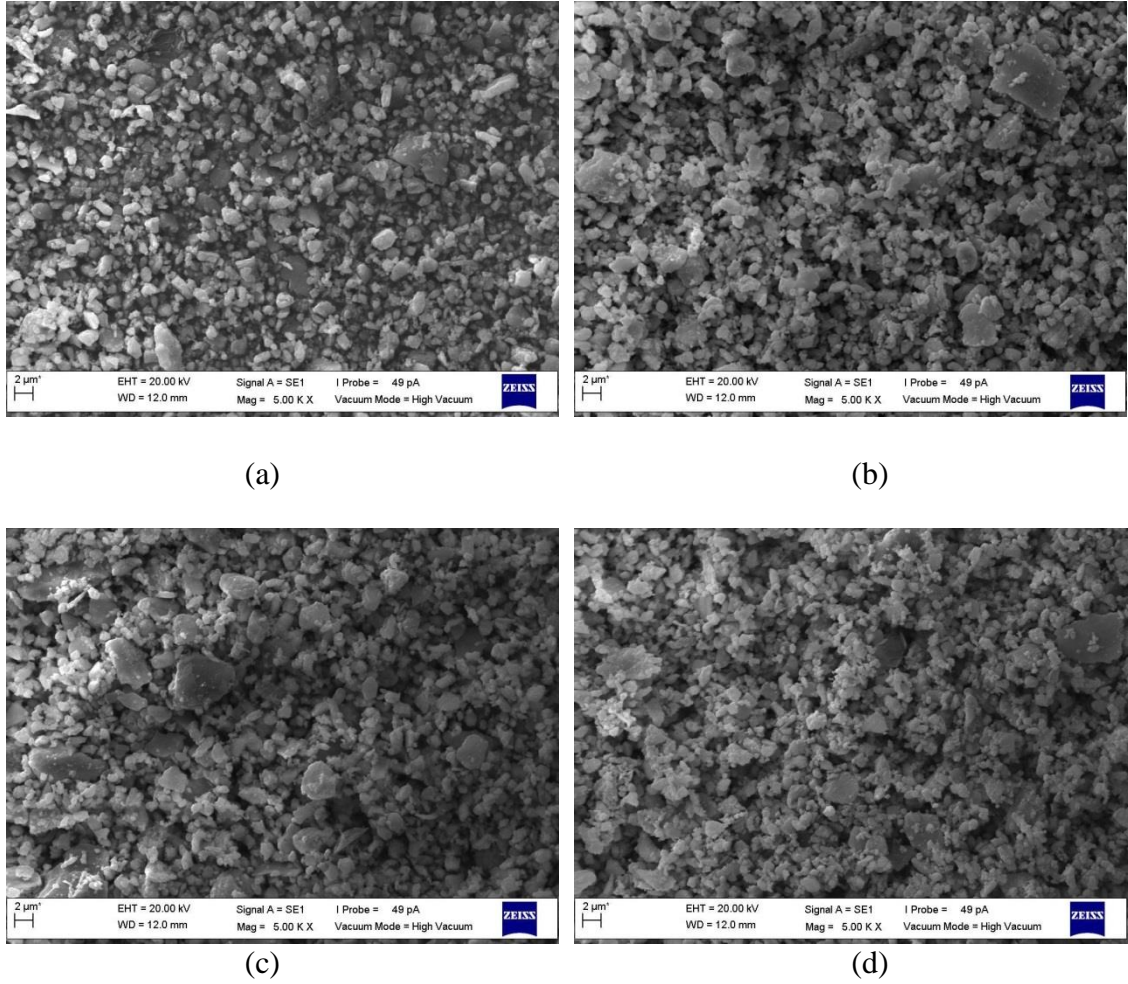
Tablo 6. Numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N)

Numuneler	Elementlerin dağılımı (%)									
	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Ba
A0	9,70	34,83	1,04	5,67	3,35	4,27	2,39	28,24	1,56	8,95
AB5	7,78	33,96	0,96	3,09	3,02	7,40	1,67	27,41	4,98	9,73
B10	7,13	34,22	1,54	3,60	5,04	5,03	4,35	25,67	2,48	10,94
A0	9,70	34,83	1,04	5,67	3,35	4,27	2,39	28,24	1,56	8,95
AG5	15,04	33,84	0,88	4,82	3,35	5,99	3,08	20,38	2,20	10,42
G10	20,70	33,96	0,72	1,43	3,52	4,45	2,79	17,91	2,27	12,25
B0	11,42	26,63	1,38	2,43	3,95	6,39	4,10	27,11	2,32	14,27
BB5	9,84	22,71	1,16	2,69	3,77	6,59	2,60	27,50	4,84	18,30
B10	7,13	34,22	1,54	3,60	5,04	5,03	4,35	25,67	2,48	10,94
B0	11,42	26,63	1,38	2,43	3,95	6,39	4,10	27,11	2,32	14,27
BG5	14,12	27,85	1,44	1,66	2,95	6,18	3,18	28,28	2,51	11,83
G10	20,70	33,96	0,72	1,43	3,52	4,45	2,79	17,91	2,27	12,25

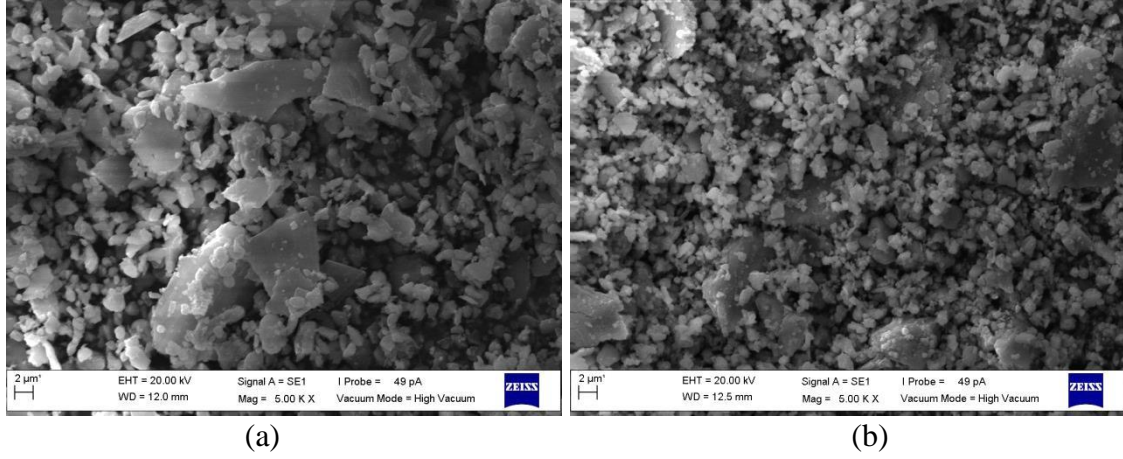
Şekil 35-37’de aşınma testleri sonunda toplanan numunelere ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri verilmiştir. Tipik aşınma parçacıkları, bozunmuş polimer matris bileşenleri, kırılmış kopmuş elyaf parçacıkları ve karşı yüzeyin metalik aşınma tozlarından meydana gelmektedir. A0 ve B0 numunelerinin aşınma parçacıkları daha fazla ince küresel aşınma parçacıkları ve az miktarda plaka şeklinde aşınma parçacıkları üretmiştir. AB5, AG5, BB5 ve BG5 numunelerinin aşınma parçacıkları hem ince küresel şekilde hem de plaka şeklindedir. B10 ve G10 numunelerinin aşınma parçacıkları ise daha çok plaka şeklindedir.



Şekil 35. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) A0 b) B0 numunesi.



Şekil 36. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) AB5 b) AG5 c) BB5 d) BG5



Şekil 37. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) B10, b) G10

Tablo 7’ de aşınma testleri sonunda toplanan aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutları verilmiştir. Numunelerin aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutları katı yağlayıcı oranı artınca ve aşındırıcı oranı azalınca artmıştır. BG grubu numunelerin aşınma parçacıklarının tane boyutlarında belirgin bir fark söz konusu değildir.

Tablo 7. Numunelerin aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu

Aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu ( $\mu\text{m}$ )							
AB Grubu		AG Grubu		BB Grubu		BG Grubu	
A0	2,72	A0	2,72	B0	2,77	B0	2,77
AB3	2,74	AG3	2,73	BB3	2,81	BG3	2,68
AB5	2,95	AG5	2,75	BB5	3,32	BG5	2,88
AB7	3,55	AG7	2,75	BB7	3,50	BG7	2,64
B10	3,99	G10	2,93	B10	3,99	G10	2,93

Tablo 8’ de aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları verilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere aşınma parçacıklarındaki Fe oranı katı yağlayıcı oranının azalması ve aşındırıcı oranının artması ile artmıştır. Aşındırıcı oranının artması, karşı yüzeyin özgül aşınma miktarını arttırmıştır. En yüksek Fe oranı katı yağlayıcı içermeyen A0 ve B0 numunelerinde gözlenirken en düşük Fe oranı da aşındırıcı içermeyen B10 ve G10 numunelerinde gözlenmiştir.

Tablo 8. Numunelerin aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N)

Numuneler	Elementlerin dağılımı (%)									
	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Ba
A0	4,03	27,29	0,89	3,20	2,32	3,51	1,07	47,92	2,11	7,66
AB5	5,14	29,40	0,84	2,26	2,51	4,14	1,00	43,87	2,96	7,88
B10	4,49	38,13	1,11	2,11	3,90	4,74	3,44	28,38	2,21	11,49
A0	4,03	27,29	0,89	3,20	2,32	3,51	1,07	47,92	2,11	7,66
AG5	5,20	33,42	1,17	1,82	2,69	3,91	1,01	41,73	2,52	6,53
G10	10,41	37,91	1,48	3,45	5,53	4,18	4,39	23,22	2,59	6,84
B0	4,54	26,28	0,81	0,68	2,06	3,21	0,85	53,93	1,58	6,06
BB5	4,58	24,22	1,20	0,98	2,08	3,37	0,68	54,16	3,05	5,68
B10	4,49	38,13	1,11	2,11	3,90	4,74	3,44	28,38	2,21	11,49
B0	4,54	26,28	0,81	0,68	2,06	3,21	0,85	53,93	1,58	6,06
BG5	5,23	31,30	1,15	0,94	2,51	3,36	0,71	47,91	1,97	4,92
G10	10,41	37,91	1,48	3,45	5,53	4,18	4,39	23,22	2,59	6,84

### 3.2.2. Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları ile İlgili Bulgular

Çalışmanın ikinci kısmında farklı aşındırıcı tane boyutlarının, numunelerin sürtünme ve aşınma özellikleri üzerine etkilerini incelemek amacıyla SAE J661 standardına göre testler yapılmıştır. 3 grupta da hacimsel olarak %5 oranda h-BN ve hacimsel olarak % 5 oranında aşındırıcı kullanılmıştır. Aşındırıcı tane boyutu değişken olarak kullanılmış ve testler sonucunda sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi, sürtünme katsayısının frenleme sayısı ile değişimi, özgül aşınma miktarları tespit edilmiştir. Ayrıca aşınmış numune yüzeylerinin ve aşınma parçacıklarının SEM ve EDS analizleri sonucunda aşınma mekanizmaları hakkında bilgiler elde edilmiştir.

#### 3.2.2.1. Disk Sıcaklığı ve Frenleme Sayısının Sürtünme Katsayısına Etkisi

Şekil 38-40' da sabit kayma koşullarında( hız:411 d/dk, yük:670 N) sırasıyla A, S, ve B grubu numunelerinin sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi verilmiştir.

Şekil 38' de görüldüğü gibi A63 numunesinin sürtünme katsayısı testin başlangıcından yaklaşık 300 °C disk sıcaklığına kadar artan sıcaklıkla birlikte sürekli

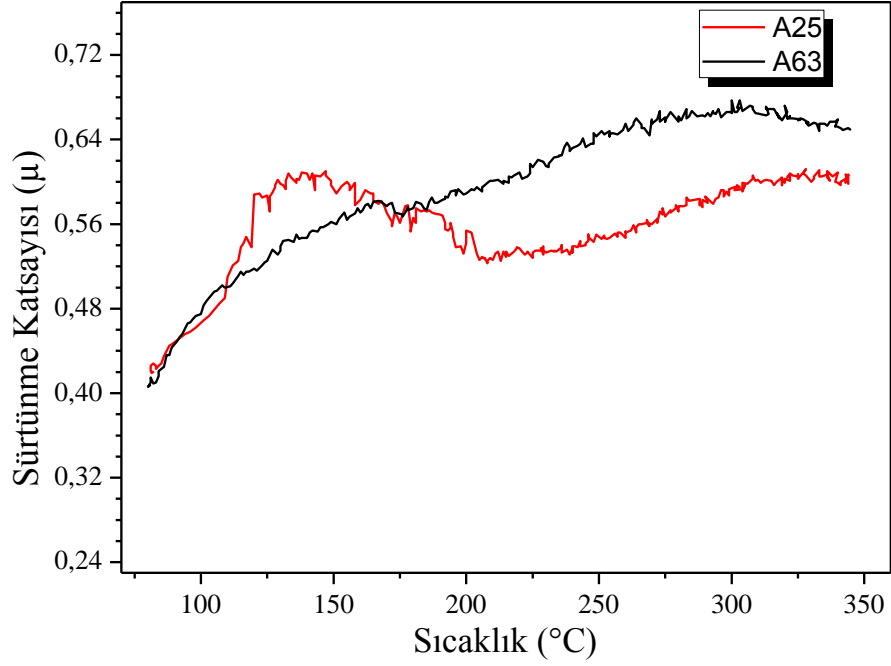


yükselmiş, daha sonra düşmeye başlamıştır. A25 numunesinin sürtünme katsayısı 120 °C disk sıcaklığına kadar artış göstermiş daha sonra düşmeye başlamış ve 200 °C disk sıcaklığından sonra tekrar yükselmeye başlamıştır. A25 numunesinin sürtünme katsayısı yüksek sıcaklıklarda çok az düşmüş ve daha iyi feyd dayanımı göstermiştir. A25 numunesinin sürtünme katsayısı test başlangıcında 0,40 iken 0,66' ya kadar yükselmiş ve yaklaşık 0,58 ile testi tamamlamıştır. Daha iri taneli alüminyum oksit içeren A63 numunesinin sürtünme katsayısı da test başlangıcında yaklaşık 0,40 iken disk sıcaklığının artması ile kararlı şekilde 0,68 değerine ulaşmış ve yüksek sıcaklıkta çok az feyd göstererek testi 0,65 ile tamamlamıştır.

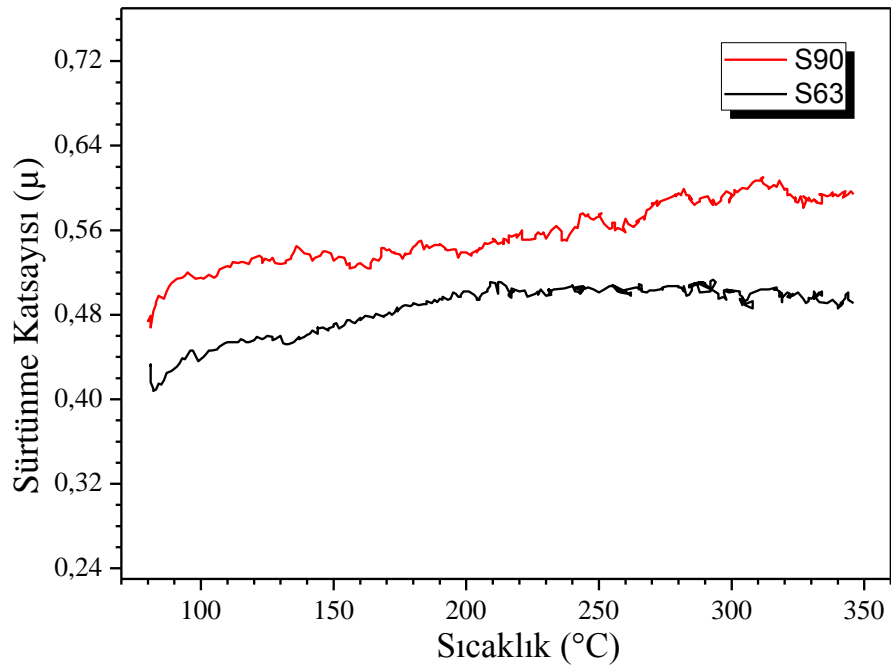
Şekil 39'da görüldüğü gibi S63 numunesinin sürtünme katsayısı artan disk sıcaklığı ile yaklaşık 200 °C disk sıcaklığına kadar kararlı şekilde yükselmiştir. 220 °C disk sıcaklığına ulaşıldıktan sonra test sonuna kadar az miktarda düşmüştür. Daha iri taneli silisyum karbür içeren S90 numunesinin sürtünme katsayısı yaklaşık 300 °C disk sıcaklığına kadar dalgalanarak yükselmiştir. 300 °C disk sıcaklığına ulaşıldığında sürtünme katsayısı çok az düşmüş ve tekrar yükselişe geçerek testi tamamlamıştır. S grubu numunelerinin sürtünme katsayılarında test başlangıcındaki değeri ile test sonundaki değeri arasında çok fazla fark meydana gelmemiş ve neredeyse başlangıçtaki sürtünme katsayısı değerinde testler tamamlanmıştır. İnce taneli S63 numunesinin sürtünme katsayısı test başlangıcında 0,41 iken test sonunda 0,46 daha iri taneli S90 numunesinin sürtünme katsayısı ise test başlangıcında 0,47 iken test sonunda 0,54 olmuştur.

B grubu numunelerinin sürtünme katsayıları benzer davranış göstermişlerdir. (Şekil 40). En ince taneli bor karbür içeren B25 numunesinin sürtünme katsayısı test başlangıcından 120 °C disk sıcaklığına kadar ani şekilde yükselmiş, 120-240 °C disk sıcaklığı aralığında yavaş şekilde yükselmeye devam etmiştir. Disk sıcaklığı 240 °C' ye ulaştığında ise az miktarda düşmüştür. 300 °C disk sıcaklığına ulaşıldığında ise orta şiddetli dalgalanmalar ile önemli bir feyd davranışı göstermeden testi tamamlamıştır. Test başlangıcında 0,39 olan sürtünme katsayısı test sonunda 0,53 olmuştur. Test başlangıcında 0,48 olan B90 numunesinin sürtünme katsayısı 100 °C disk sıcaklığına kadar ani artışla 0,58 olmuştur. 100-150 °C disk sıcaklığı arasında en yüksek değeri 0,62' ye ulaşmış ve bu sıcaklıktan sonra düşmeye başlamıştır. Disk sıcaklığı 200 °C'yi geçtikten sonra şiddetli şekilde dalgalanarak düşmeye devam etmiş ve testi 0,49 ile tamamlamıştır. En iri taneli bor karbür içeren B180 numunesinin sürtünme katsayısı test başlangıcından yaklaşık 100 °C disk sıcaklığına kadar ani şekilde yükselmiş ve 100-150 °C aralığında sabit kalmıştır. Disk

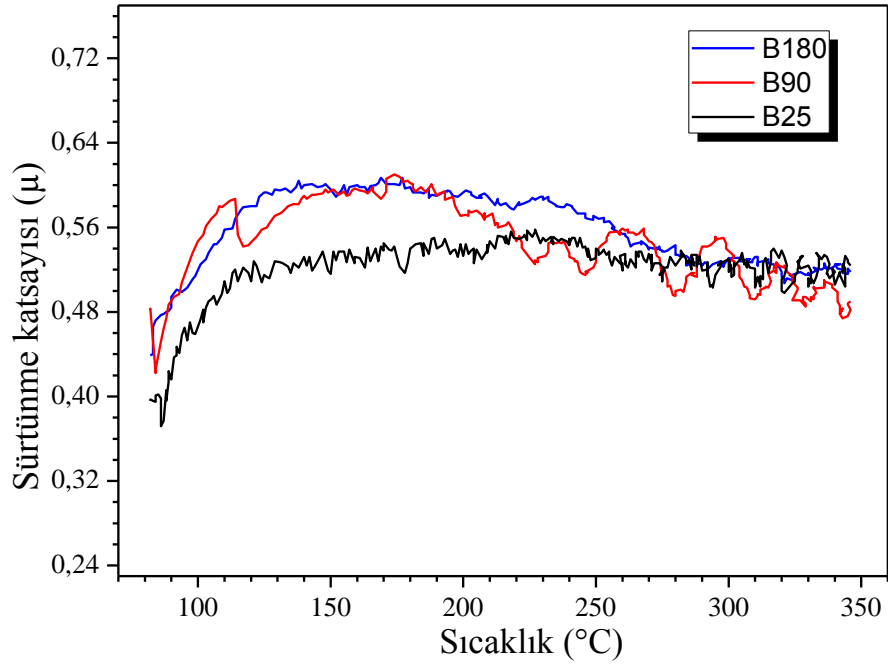
sıcaklığı 150 °C' yi geçtikten sonra numunenin sürtünme katsayısı düşmeye başlamış ve test sonuna kadar kararlı bir şekilde düşmüştür. Test başlangıcında 0,44 olan sürtünme katsayısı test sonunda 0,52 olmuştur.



Şekil 38. A grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi

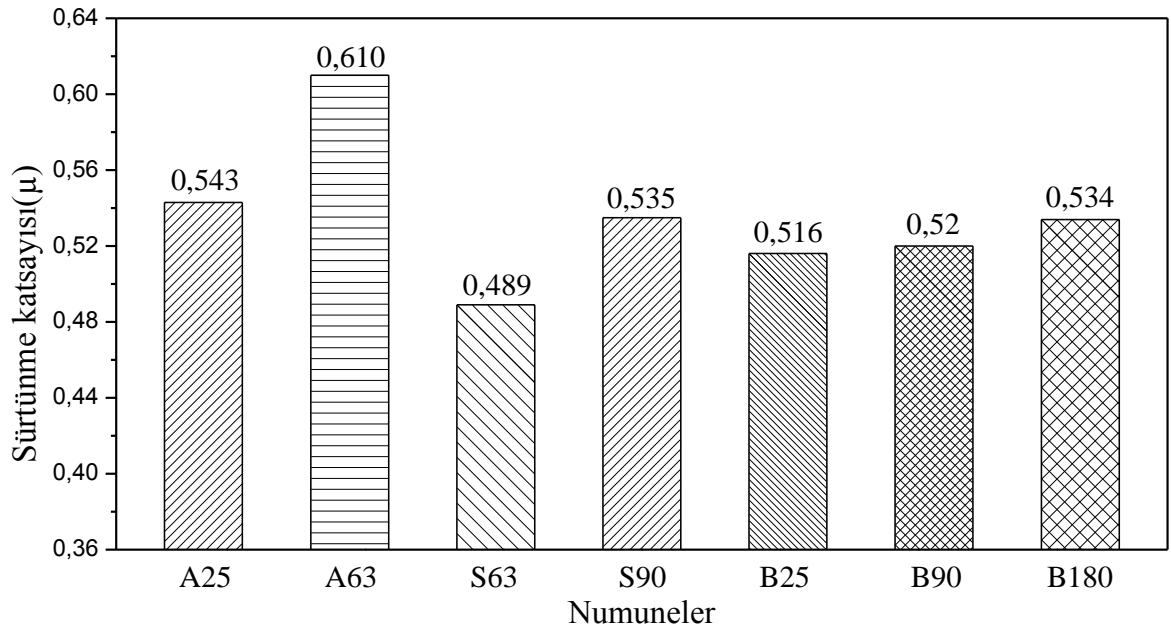


Şekil 39. S grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi



Şekil 40. B grubu numunelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimi

Şekil 41' de numunelerin ortalama sürtünme katsayıları verilmiştir. Tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayıları artan aşındırıcı tane boyutu ile yükselmiştir.



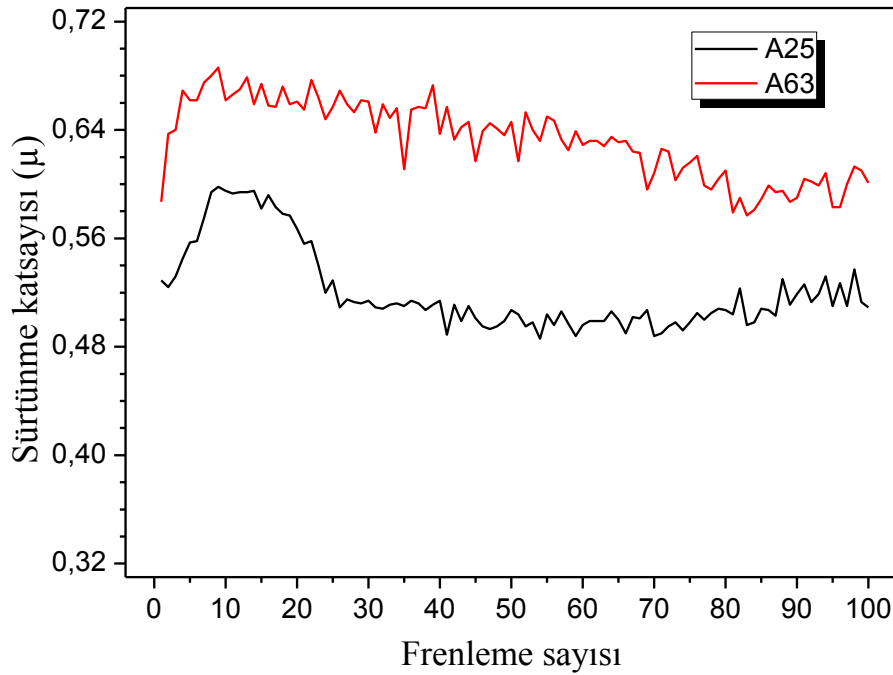
Şekil 41. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları



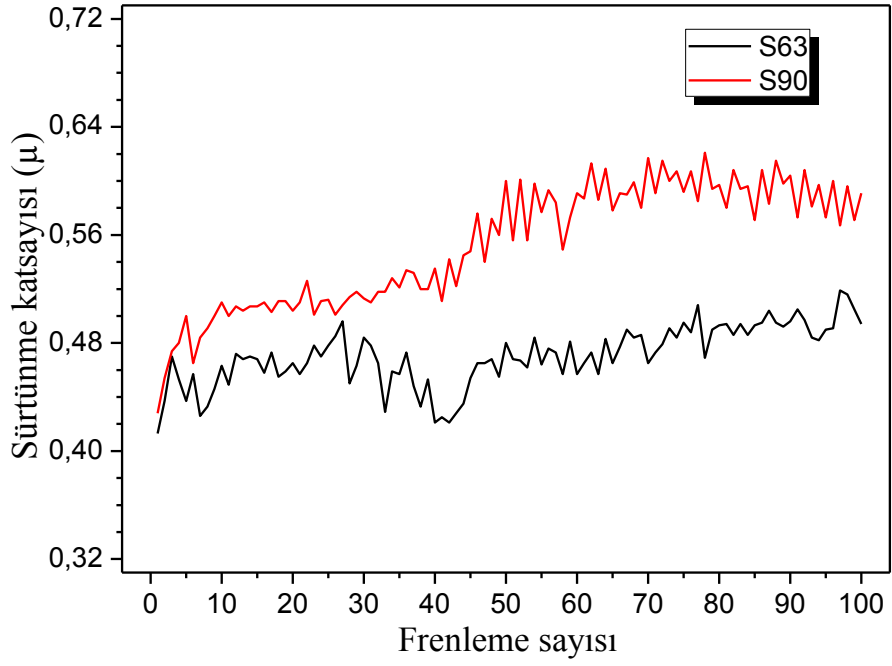
Şekil 42-44' de sırasıyla A, S, ve B grubu numunelerinin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi gösterilmektedir. Şekil 42' de görüldüğü gibi A25 numunesinin sürtünme katsayısı ilk 10 frenleme ile sürekli yükselmiş daha sonra düşmüştür ve 20 frenleme sayısından sonra nispeten sabit değer alarak kararlı şekilde testi tamamlamıştır. Başlangıçta 0,52 olan sürtünme katsayısı test başlangıcında 0,60'a kadar yükselmiş ve 0,50 ile testi tamamlamıştır. A63 numunesinin sürtünme katsayısı ise test başlangıcında 0,58 iken ilk 10 çevrimde 0,69' a kadar yükselmiş ve artan frenleme sayısı ile kararlı şekilde azalarak 0,60 ile testi tamamlamıştır.

S63 numunesinin sürtünme katsayısı artan frenleme sayısı ile hafif bir artış göstermiş, 0,41 ile başladığı testi 0,49 ile tamamlamıştır. S90 numunesinin sürtünme katsayısı ise 40 çevrime kadar yükselmiş ve daha sonra kararlı hale gelmiştir. 0,42 ile başladığı testi 0,60 ile tamamlamıştır (Şekil 43).

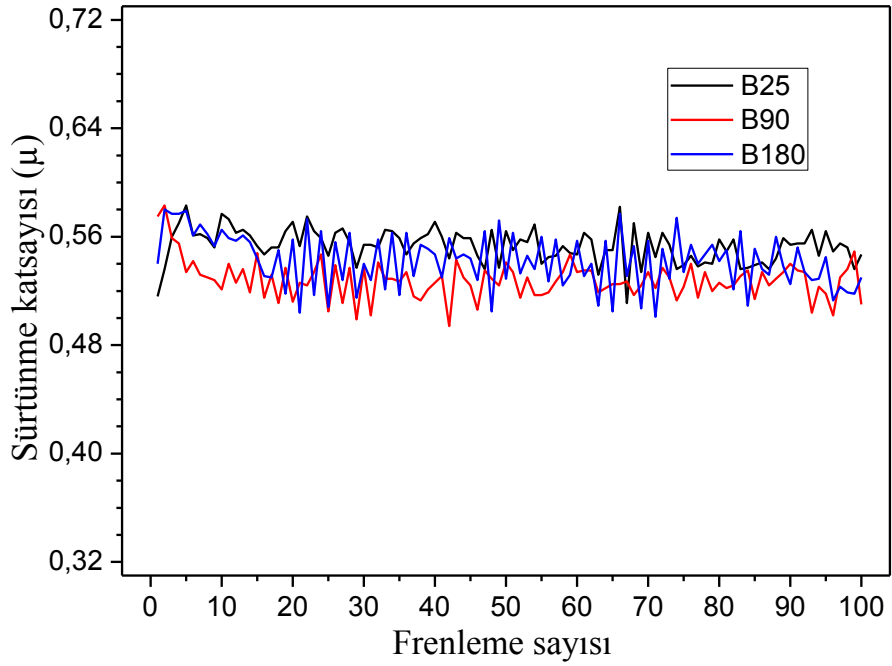
Şekil 44' de ise B grubu numunelerinin sürtünme katsayılarında frenleme sayısı ile belirgin bir değişim göstermediği görülmektedir. Her 3 numunede test süresince benzer davranış sergilemiştir. 3 grupta da iri taneli aşındırıcı içeren numunelerin sürtünme katsayıları ince taneli aşındırıcı içeren numunelerin sürtünme katsayılarından daha yüksektir.



Şekil 42. A grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi



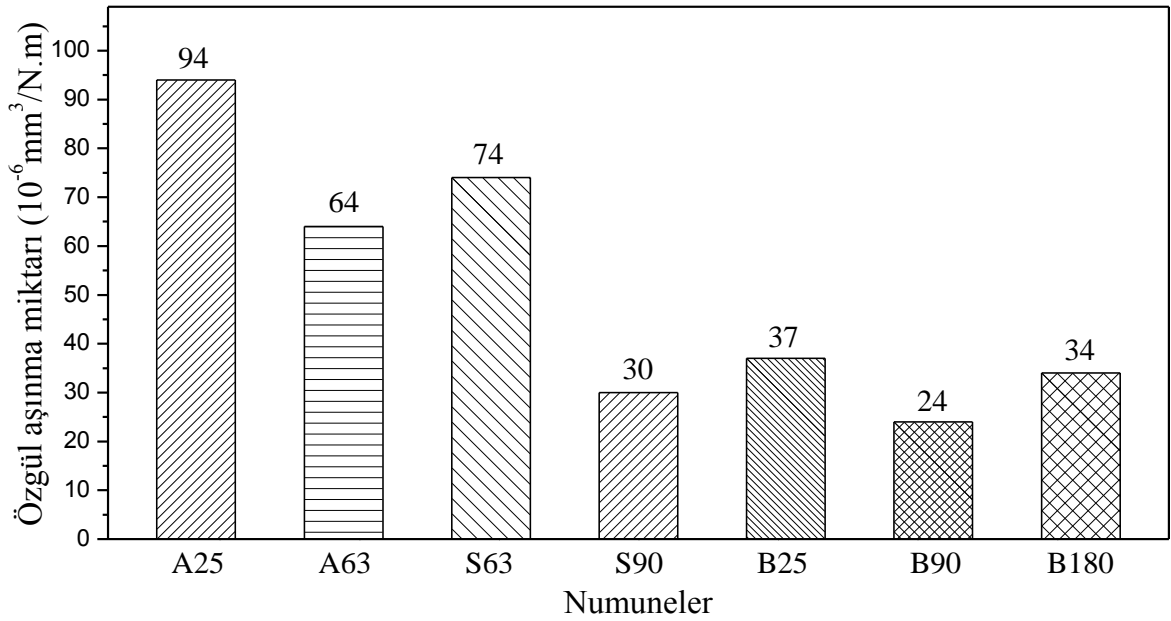
Şekil 43. S grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi



Şekil 44. B grubu numunelerin sürtünme katsayılarının frenleme sayısı ile değişimi.

### 3.2.2.2. Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Özgül Aşınma Miktarları ile İlgili Bulgular

Şekil 45’ de numunelerin özgül aşınma miktarları verilmiştir. İri taneli aşındırıcı içeren numunelerin özgül aşınma miktarları ince taneli aşındırıcı içeren numunelerin özgül aşınma miktarlarından daha düşüktür.

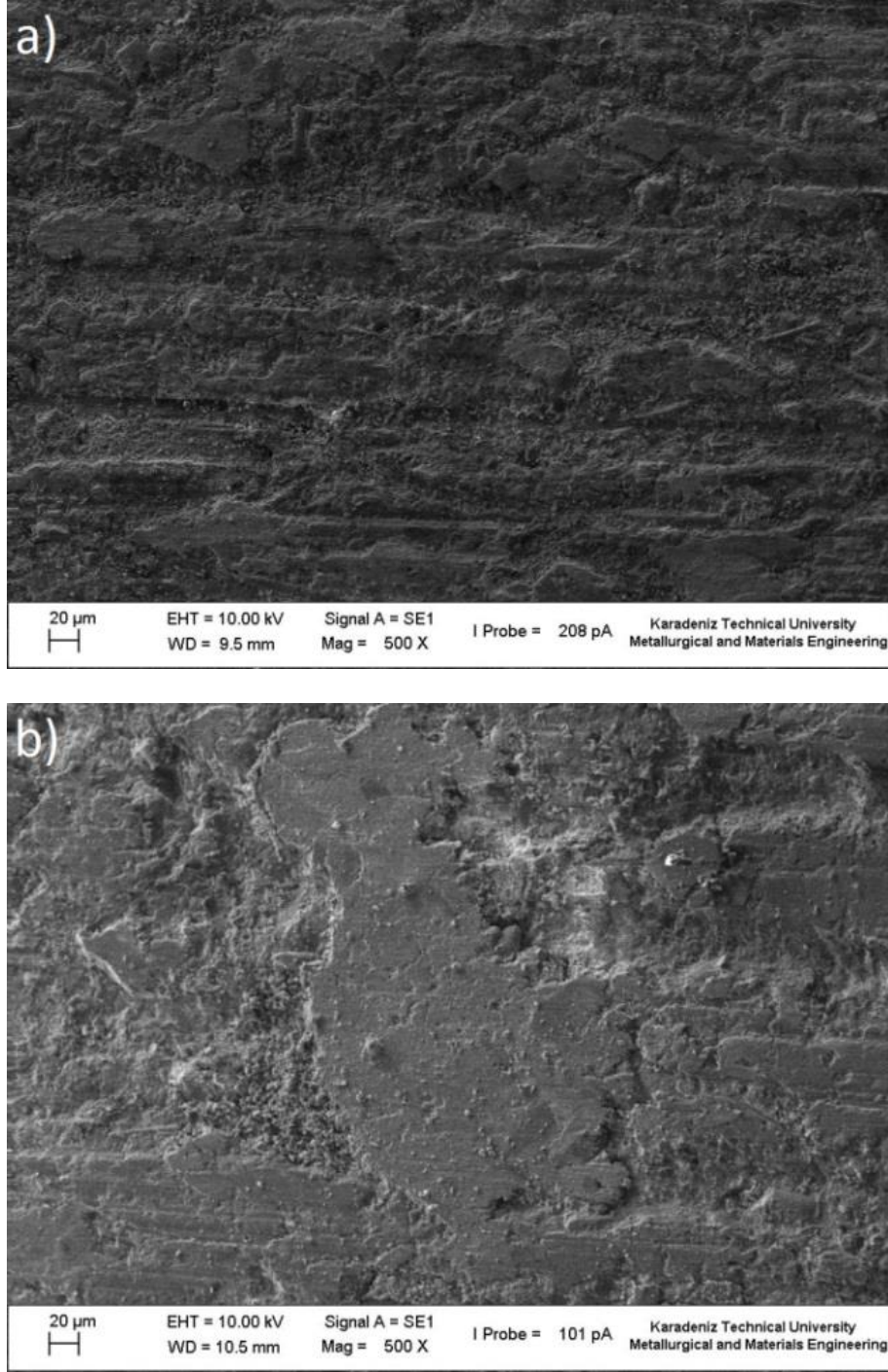


Şekil 45. Numunelerin özgül aşınma miktarları

### 3.2.2.3. Farklı Tane Boyutuna Sahip Aşındırıcı İçeren Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesi

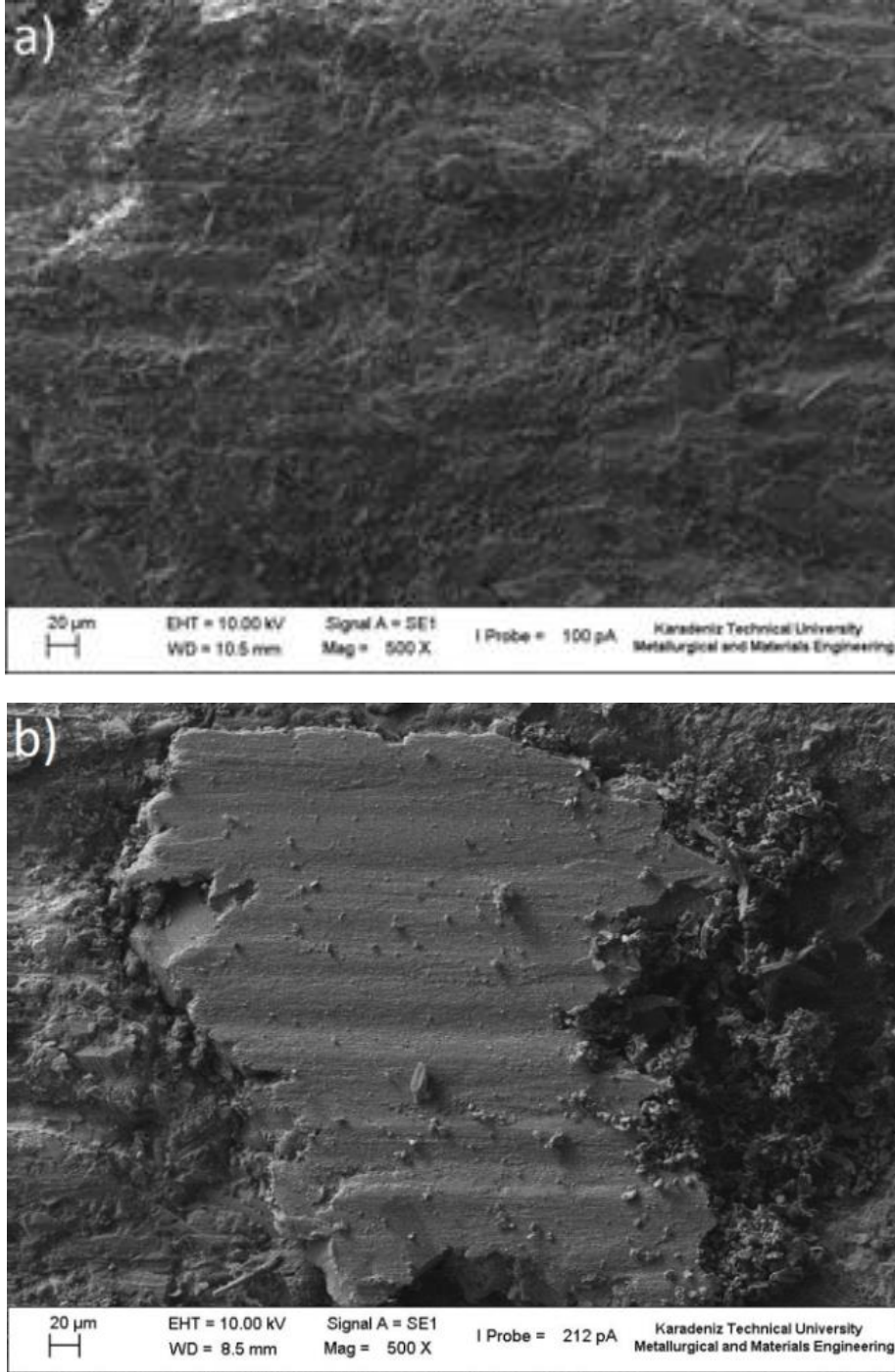
Şekil 46-48’ de numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri ve Tablo 9’ da aşınmış yüzeylerin EDS analiz sonuçları verilmiştir.

Şekil 46 a’ da A25 numunesinin yüzeyinde ince alüminyum oksit tanelerinden meydana gelmiş düzensiz temas bölgeleri görülmektedir. Bunlar birincil temas bölgeleridir. Şekil 46 b’ de ise A63 numunesinin yüzeyinde düzgün ve geniş sürtünme filmi görülmektedir.



Şekil 46. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) A25 b) A63

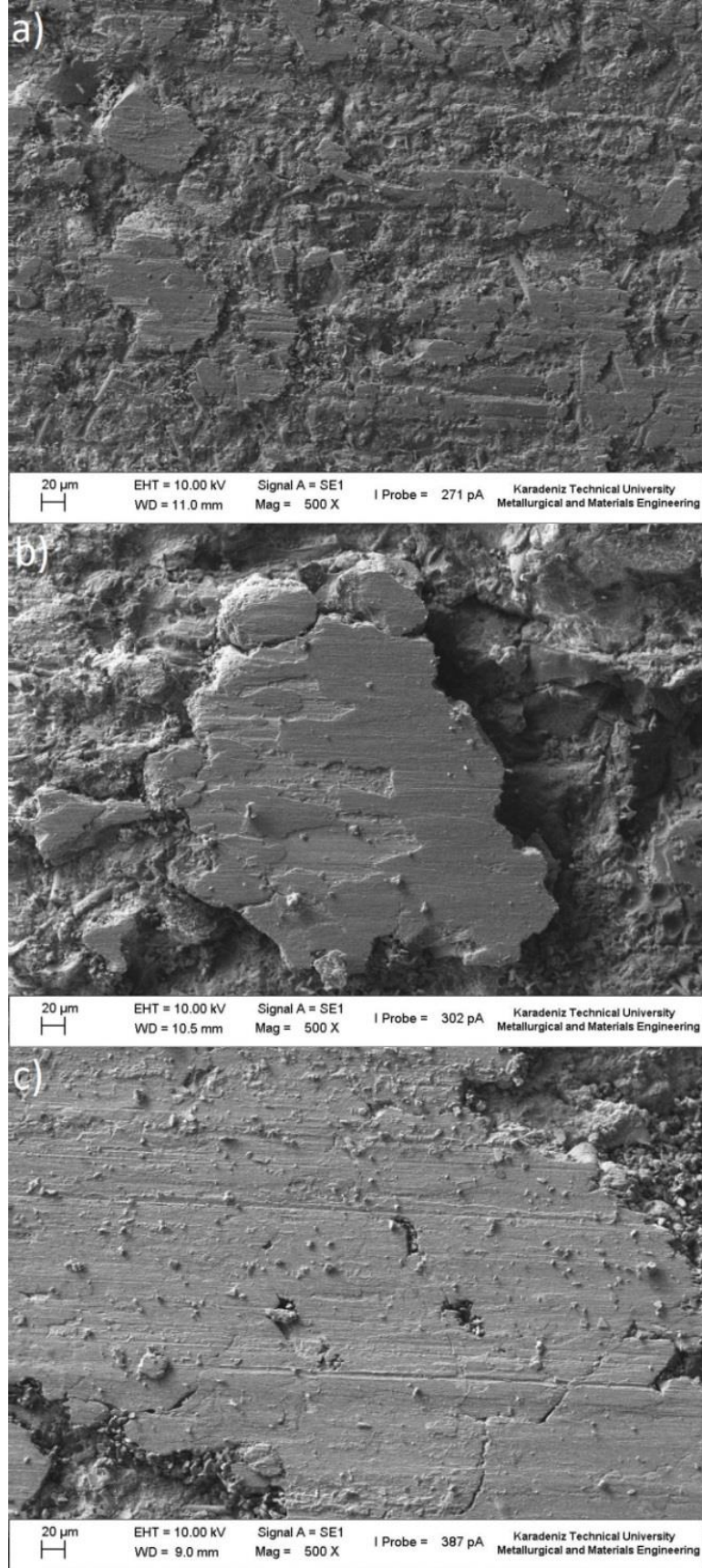
Şekil 47 a'da S63 numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 47 b' de S90 numunesinin yüzeyindeki sürtünme filmi, aşınmış yerinden ayrılmış elyaflar, matris ve film kaybı bölgeleri, aşınma parçacıkları ve elyaf kaybı boşlukları görülmektedir.



Şekil 47. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) S63 b) S90

Şekil 48 a-c' de sırasıyla B25, B90 ve B180 numunelerinin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. En geniş sürtünme filmi en iri taneli aşındırıcı içeren B 180 numunesinin yüzeyinde meydana gelmiştir.





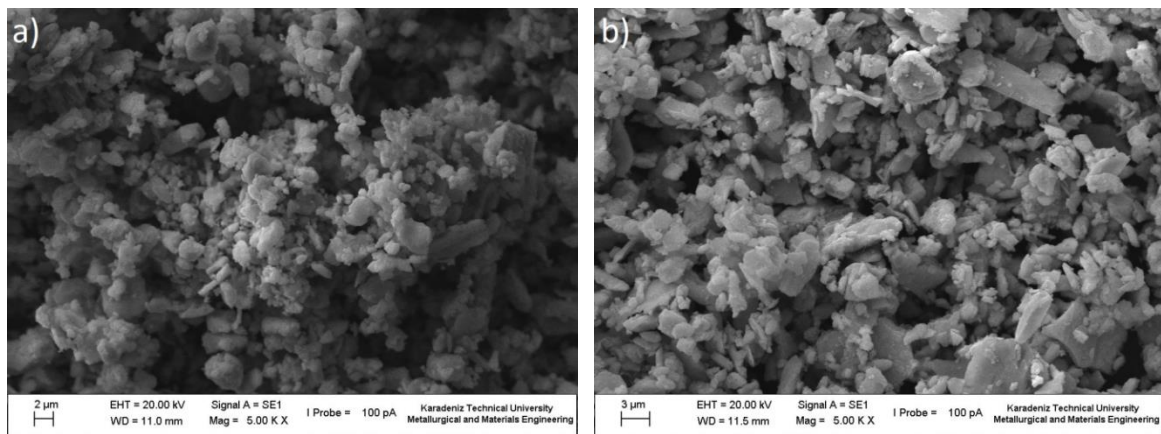
Şekil 48. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) B25 b) B90c) B180

Tablo 9’da numunelerin aşınmış yüzeylerinin EDS analiz sonuçları verilmiştir. Numunelerin aşınma yüzeylerinde diğer elementlerin yanı sıra temel olarak C, O, Fe, Ba ve B bulunmaktadır. İri taneli aşındırıcı içeren numunelerin aşınma yüzeylerinde bulunan Fe oranı ince taneli aşındırıcı içeren numunelerin aşınma yüzeylerinde bulunan Fe oranından daha fazladır.

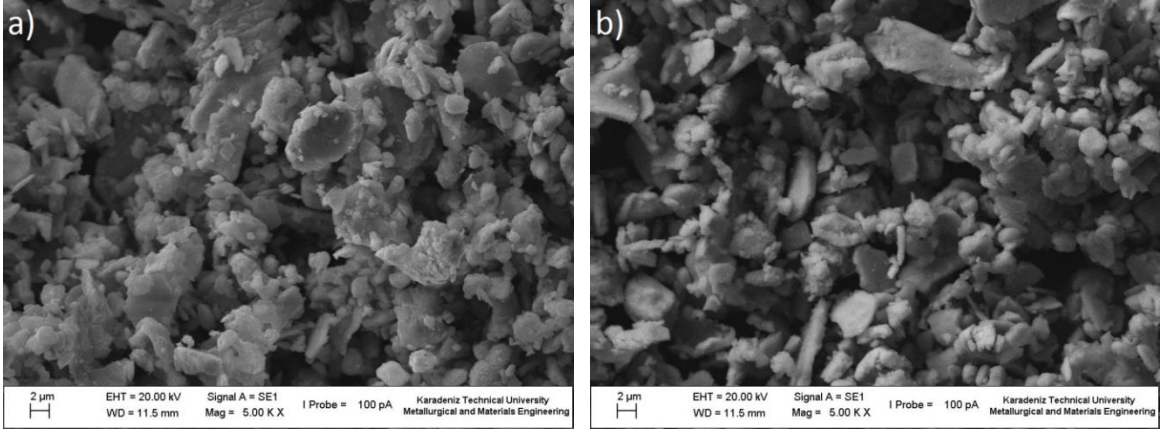
Tablo 9. Numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N)

Numuneler	Elementlerin dağılımı (%)										
	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Ba	B
A25	4,45	9,34	0,93	0,87	1,11	2,27	1,42	63,82	10,61	0,95	4,24
A63	6,01	6,99	0,78	0,56	0,46	0,88	0,23	71,67	7,11	1,06	4,24
S63	3,88	29,73	0,69	0,51	1,52	0,42	1,97	56,30	1,12	0,99	2,86
S90	2,98	8,35	0,85	0,54	0,66	2,05	0,30	66,02	14,14	1,01	3,11
B25	6,01	31,90	1,35	2,01	4,32	3,41	16,88	25,23	3,62	1,49	3,78
B90	3,24	32,31	1,01	1,51	3,02	2,05	14,71	32,30	5,26	1,20	3,39
B180	3,94	25,58	0,91	1,51	3,32	2,74	14,01	39,46	4,03	1,31	3,18

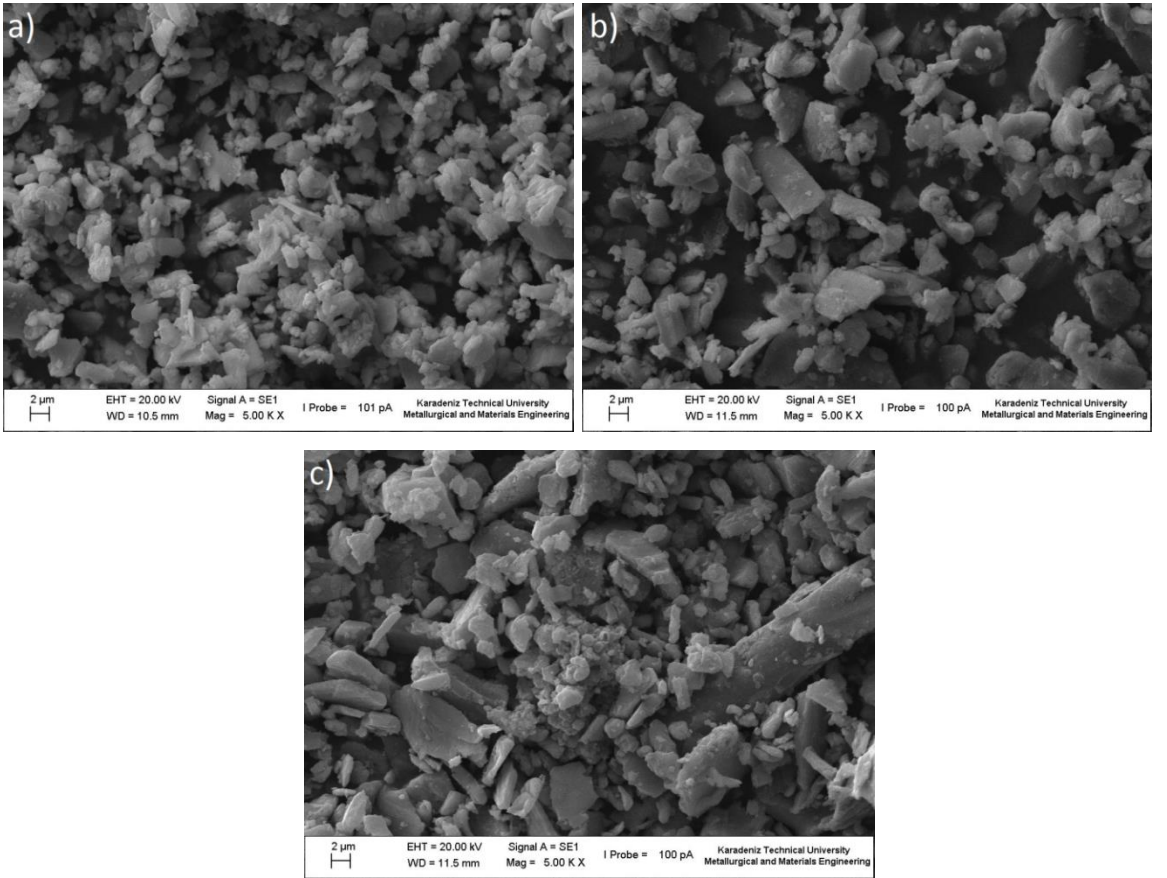
Şekil 49-51’ de aşınma testleri sonunda toplanan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri verilmiştir. İnce aşındırıcı tane içeren numuneler çoğunlukla ince küresel yapıda ve az miktarda plaka şeklinde aşınma parçacıkları meydana getirmiştir (Şekil 49 a, 50 a, 51 a). İri aşındırıcı tane içeren numuneler ise çoğunluğu plaka şeklinde ve az miktarda küresel formda aşınma parçacıkları meydana getirmiştir (Şekil 49 b, 50 b, 51 b-c).



Şekil 49. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri a) A25 b) A63



Şekil 50. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri a) S63 b) S90



Şekil 51. Numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri a) B25 b) B90 c) B180



Tablo 10' da aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutları verilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi artan aşındırıcı tane boyutu ile aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu artmıştır.

Tablo 10. Aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu

Aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu ( $\mu\text{m}$ )					
A Grubu		S Grubu		B Grubu	
A25	3,21	S63	4,57	B25	3,48
A63	5,28	S90	6,41	B90	5,64
				B180	8,29

Tablo 11' de numunelerin aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları verilmiştir. Aşındırıcı tane boyutu artınca aşınma parçacıkları arasındaki Fe oranı da artmıştır.

Tablo 11. Numunelerin aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları (sıcaklık: 200 °C, kayma hızı: 411 d/dk, uygulanan yük: 670N)

Numuneler	Elementlerin dağılımı (%)										
	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Ba	B
A25	7,54	24,52	0,95	1,24	2,72	7,64	12,80	32,99	2,53	1,13	5,92
A63	5,70	24,61	1,34	1,53	3,11	3,63	10,93	39,94	3,41	1,30	4,52
S63	8,51	29,99	1,39	1,46	2,64	4,70	6,47	36,23	1,54	0,96	6,11
S90	5,28	25,35	1,38	2,05	2,49	4,92	6,66	42,81	2,58	1,35	5,11
B25	7,20	25,95	1,79	1,76	2,72	4,66	4,14	43,37	2,17	1,00	5,24
B90	10,26	23,92	1,65	0,66	1,78	3,44	5,43	46,22	0,61	1,03	5,00
B180	2,74	12,36	1,09	1,58	3,29	0,55	2,33	71,17	1,26	1,34	2,28

#### 4. İRDELEME

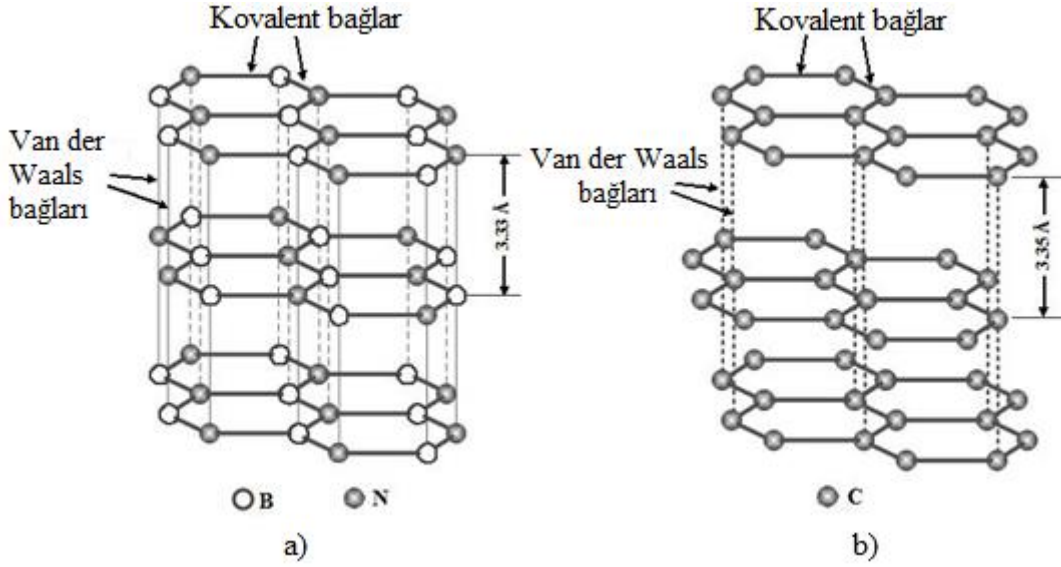
Şekil 15-18' de görüldüğü gibi, numunelerin sürtünme katsayılarında deneyin başlamasıyla birlikte ani artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni artan sıcaklıkla birlikte gerçek temas alanlarının artmasıdır. Deneyin başlamasıyla birlikte birincil temas platoları oluşmaya başlar ve gerçek temas alanları da artar. Numunelerin anlık gerçek temas alanları birincil temas platoları içerisinde kalmaktadır. Birincil temas platolarını balata yüzeyine gömülü, kırılmış fiber ve sert aşındırıcı parçacıkları oluşturmaktadır. Birincil temas platolarını oluşturan daha yüksek aşınma dayanımına sahip ve mekanik olarak kararlı bileşenlerin arkasında birikerek sıkışan aşınma parçacıkları ise ikincil temas platolarını oluşturmaktadır. Deney başlangıcında sürtünme matris- disk şeklinde olurken artan deney süresi ve sıcaklıkla birlikte matrisin aşınmasıyla elyaf parçacıkları yüzeye çıkmakta ve sürtünme ağırlıklı olarak elyaf-disk şekline dönüşmektedir. Balatanın pürüzlü yüzeyi aşındığında, birincil temas platoları ortaya çıkmakta ve disk balata ara yüzeyindeki gerçek temas alanlarını artırmaktadır. Temas alanının artması sürtünme katsayısını arttırmıştır (Şekil 15-18) [30].

A0 ve B0 numuneleri hariç, AB ve BB grubu numunelerin 345 °C' ye kadar sürtünme katsayısı değerlerinde beklenmedik bir değişim olmadığından bu numuneler için yüksek sıcaklık feyd dayanımları iyi diyebiliriz. Fakat AG ve BG grubu numunelerinin feyd dayanımları zayıftır. Feyd, balatayı oluşturan bileşenlerin özellikle fenolik reçinenin yüksek sıcaklıklarda piroliz olması ve sürtünme ara yüzeyinde oluşan sürtünme filminin bozulması nedeniyle meydana gelir. Genellikle katı yağlayıcıların varlığı balataların ısıl dayanımı artırır ve yüksek sıcaklıklarda balatanın yağlama özelliğinin devam etmesini sağlar. Bu çalışmada katı yağlayıcı olarak grafit ve h-BN (hegzagonal bor nitrid) kullanılmıştır. Grafit genellikle düşük sıcaklıklarda yağlayıcı olarak işe yaramaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kısmen yapısı bozulduğu ve oksidasyona uğradığı için kararlı bir sürtünme filmi oluşturamaz. h-BN ise yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direnci, mükemmel yağlama özellikleri ve iyi ısıl dayanıma sahiptir. h-BN' ün yüksek sıcaklıklarda iyi bir yağlayıcı olması sürtünme filminin gelişmesine, ısıl direncin artmasına neden olur. Eğer sürtünme filmi sürekli ve kararlı ise fren balatası yüksek sıcaklıklarda sabit bir sürtünme katsayısı değeri ve düşük aşınma miktarına sahip olur. Sürtünme tabakası birincil temas

platolarının arasında biriken aşınma parçacıkları tarafından oluşturulur. Bu tabaka matrisle birlikte ikincil temas platolarını oluşturarak normal yükün taşınmasına katkıda bulunur (Şekil 31,32,33) [30]. Sürtünme tabakası içinde bulunan parçacıklar arasında güçlü bir bağ oluşmadığı için aşınma esnasında küçük parçacıklar halinde yüzeyden ayrılırlar. Disk sıcaklığının artması ile birlikte disk balata ara yüzeyinde ovalanan bu tabaka içerisindeki parçacıklar yumuşayan matris bileşenleri ile birleşerek film oluştururlar (Şekil 34 a ve b). Bununla birlikte,  $Al_2O_3$  veya  $B_4C$  gibi aşındırıcılar yuvarlanma yüzeyindeki piroliz olmuş bileşenlerin giderilmesi ve yüzeylerin yenilenmesi amacıyla katılırlar [34]. Şekil 15-18' de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının ve feyd sıcaklığının maksimum değeri aşındırıcı ve katı yağlayıcının tipi ve oranından kuvvetli bir şekilde etkilenmiştir [35].

A0, AG3, AG5 ve AG7 numunelerinin 150-300 °C arasında benzer sürtünme katsayısı sonuçları vermeleri grafitin sürtünme katsayısı üzerine etkisinin az olduğunu göstermiştir. Sadece, bileşiminde alüminyum oksit içermeyen G10 numunesi farklı bir eğilim göstermiştir. Alüminyum oksitin sürtünme katsayısı üzerinde çok kuvvetli etkisinin olduğu bu gruptaki diğer numuneler göstermektedir. Alüminyum oksitin sürtünme katsayısı üzerine kuvvetli etkisi grafit oranının hacimce %7 değerine kadar görülmüştür.

Ortalama sürtünme katsayısı değeri tüm numune gruplarında artan yağlayıcı oranı ve azalan aşındırıcı oranı ile düşmüştür. Fakat BG grubu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerinde bir uyum gözlemlenmemiştir. Eşit oranda katı yağlayıcı ve aşındırıcı kullanıldığında en yüksek ve en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerleri AB ve BG grubu numunelerinde kaydedilmiştir. Şekil 19-22' de h-BN içeren AB ve BB grubu numunelerinin ortalama sürtünme katsayılarının grafit içeren AG ve BG grubu numunelerinin ortalama sürtünme katsayılarından daha yüksek olduğu görülmektedir. h-BN ve grafit benzer kristal yapıya sahip olmalarına rağmen fenolik reçine esaslı balatadaki yağlama etkileri tamamen farklıdır. Bunun bir nedeni grafit ve h-BN atomlarının düzlemler arası mesafesinin farklı olmasıdır (Şekil 52). h-BN atomlarının düzlemler arası mesafesi 3.33 Å iken grafitin ki 3.35 Å' dur. Bu kısa düzlemler arası mesafe h-BN atomlarının daha sıkı bağlı olmasına neden olur. h-BN atomları arasındaki bağ grafit atomları arasındaki bağdan daha kuvvetlidir. Grafitin atomlar arası bağının zayıf olması nedeniyle ana düzlem boyunca kaymaya uğraması h-BN'ye göre daha kolaydır [53]. Diğer bir neden ise grafitin oksijen ve sudan etkilenmesidir. h- BN'ün yağlayıcı olarak bir diğer üstün özelliği de kafes yapısında düzlemler arasına sıkışan su ve gaz moleküllerinden etkilenmemesidir.



Şekil 52. h-BN ve grafitin kristal kafes yapıları, a) h-BN, b) grafit [53].

Aşınma, sıcaklık, kayma mesafesi, uygulama yükü, hız, sürtünme çiftinin malzeme özellikleri, sürtünme filminin mukavemeti ve çevre şartları gibi birçok faktöre bağlıdır. Aşınma, balata bileşenlerinin yapısının çeşitli mekanik ve ısı etkiler sonucu bozulması ile hasar görmesi ve aşınma parçacıkları halinde yüzeyden kopmaları şeklinde olur [54,55,56]. Numunelerin özgül aşınma miktarları artan yağlayıcı oranı ve azalan aşındırıcı oranı ile azalmıştır. Bileşiminde katı yağlayıcı içermeyen A0 ve B0 numunelerinin özgül aşınma miktarları neredeyse eşittir. Buna karşı bileşiminde aşındırıcı içermeyen G10 ve B10 numunelerini karşılaştırdığımızda B10 numunesinin özgül aşınma miktarı G10 numunesinin özgül aşınma miktarından 3 kat daha düşüktür. Aynı oranlarda katı yağlayıcı ve aşındırıcı oranlarında diğer gruplara göre en iyi aşınma direncini BB grubu numuneleri göstermiştir.

Literatüre göre sürtünme performansı ve aşınma dayanımı birbirine zıt özellik göstermektedir. Sürtünme performansı iyi ise aşınma dayanımı kötü, aşınma dayanımı iyi ise sürtünme performansı kötüdür [35, 56].

Numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, kayma yönüne paralel abrazif aşınma izleri görülmektedir. Bu izler aşınmış ve yüzeye çıkmış elyaflar ile aşındırıcı tanelerin karşı diski çizerek yüzey pürüzlülüğünü artırması ve artan

pürüzlülüklerin çentik etkisi yaparak balata yüzeyinden malzeme kaldırması ile oluşmaktadır. Bu mekanizma özgül aşınma miktarının artmasına neden olmuştur.

Tablo 6' da bazı numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS analiz sonuçları verilmiştir. Numunelerin aşınma yüzeylerinde diğer elementlerin yanı sıra temel olarak C, O, Fe ve Ba bulunmaktadır. Numune yüzeylerinde bulunan Fe oranı aşındırıcı oranının artması ve yağlayıcı oranının azalması ile artmıştır. Fe oranının artması, sürtünme esnasında dökme demir malzemedan imal edilmiş diskten balata yüzeyine malzeme transfer olduğunu göstermektedir.

Aşınma parçacıklarının incelenmesi aşınma mekanizması ve yüzeyler arasındaki etkileşim hakkında önemli bilgiler vermektedir [57]. Tipik aşınma parçacıkları, bozunmuş polimer matris bileşenleri, kırılmış kopmuş elyaf parçacıkları ve karşı yüzeyin metalik aşınma tozlarından meydana gelmektedir. Aşınma parçacıkları numune yüzeyinden kopar kopmaz ayrılabilirdiği gibi belirli bir süre sürtünme filmi gibi farklı yüzeyler meydana getirdikten sonra da ayrılabilirler. Aşınma dayanımı düşük olan A0 ve B0 gibi numuneler daha fazla ince küresel aşınma parçacıkları ve az miktarda plaka şeklinde aşınma parçacıkları üretmiştir. Orta düzeyde aşınma dayanımı sergileyen AB5, AG5, BB5 ve BG5 numunelerinin aşınma parçacıkları hem ince küresel şekilde hem de plaka şeklindedir. Aşınma dayanımı en iyi olan B10 ve G10 numunelerinin aşınma parçacıkları ise daha çok plaka şeklindedir. Tablo 7'de numunelerin aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutlarının katı yağlayıcı oranı artınca ve aşındırıcı oranı azalınca artmıştır. BG grubu numunelerin aşınma parçacıklarının tane boyutlarında belirgin bir fark söz konusu değildir. Tablo 8' den anlaşılacağı üzere aşınma parçacıklarındaki Fe oranı katı yağlayıcı oranının azalması ve aşındırıcı oranının artması ile artmıştır. Aşındırıcı oranının artması karşı yüzeyin özgül aşınma miktarını arttırmıştır. En yüksek Fe oranı katı yağlayıcı içermeyen A0 ve B0 numunelerinde gözlenirken en düşük Fe oranı da aşındırıcı içermeyen B10 ve G10 numunelerinde gözlenmiştir. Özgül aşınma miktarı sürtünme filmi ve aşınma parçacıklarının tane yapısıyla çok yakından ilişkilidir. Bu sonuçlar Kim ve arkadaşlarının bulduğu sonuçlarla örtüşmektedir [55].

Farklı tane boyutuna sahip aşındırıcı içeren numunelerin, sürtünme katsayılarının sıcaklıkla değişimlerinin verildiği Şekil 38-40'da görüldüğü gibi tüm numunelerin sürtünme katsayıları deney başlangıcında birincil temas platolarının oluşması ve anlık gerçek temas alanlarının artması nedeni ile artmıştır. Şekil 38 'de görüldüğü gibi A63 numunesinin sürtünme katsayısı artan disk sıcaklığı ile 300 °C kadar yükselmiş ve daha

sonra feyd nedeni ile düşüşe geçmiştir. A ve S grubu numunelerin sürtünme katsayılarının disk sıcaklığı ile değişimleri incelendiğinde iri taneli aşındırıcı içeren numuneler ince taneli numunelere göre daha iyi feyd dayanımı göstermiştir. Cho ve arkadaşları da zirkon tane boyutunun otomotiv fren balatalarının sürtünme performansına etkilerini incelemişler ve daha iri zirkon tanelerinin balataların feyd dayanımını geliştirdiğini tespit etmişlerdir [43]. B grubu numuneler incelendiğinde ise B25 numunesi en iyi feyd dayanımını göstermiştir.

Aşındırıcı tane boyutu daha iri olan numunelerin sürtünme katsayıları, ince taneli numunelerin sürtünme katsayılarından daha yüksektir. İnce aşındırıcı taneler ikincil temas platolarının oluşumunda yer almıştır. Sürtünme ara yüzeyinde yuvarlanarak diğer aşınma parçacıkları ile karışmış ve anlık temas alanlarını arttırmıştır. İnce tanelerin takviye özelliği olmadığından yüksek sıcaklıklarda diğer aşınma parçacıkları bozulduğunda kolaylıkla matristen ayrılırlar. Sürtünme kararlılığı iri taneli aşındırıcı kullanıldığında artmıştır. İri taneler sürtünme ara yüzeyinde birincil temas platolarını oluşturduğu için daha yüksek sürtünme katsayısına sebep olmuştur. İri taneler, ikincil temas platolarının oluşumunda yer almaz ve direk anlık gerçek temas alanlarını belirleyen birincil temas platolarını meydana getirirler. Sürtünme esnasında ince taneler balata yüzeyine gömülürken iri taneler matristen ayrılmadan balata yüzeyinde yer alırlar [43].

Kim ve arkadaşları farklı tipteki aşındırıcıların otomotiv fren balatalarının sürtünme özelliklerine etkilerini incelemiş ve aşındırıcıların artan frenleme sayısı ile körelmesi ve etrafına aşınma parçacıklarının birikmesi nedeniyle sürtünme katsayısında hafif azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Belirli bir frenleme sayısı sonrası sıcaklığında yükselmesi ile temas platoları parçalanır ve sürtünme katsayısı yavaş yavaş azalır [34].

Şekil 45' de numunelerin özgül aşınma miktarları verilmiştir. İri taneli aşındırıcı içeren numunelerin özgül aşınma miktarları ince taneli aşındırıcı içeren numunelerin özgül aşınma miktarlarından daha düşüktür. İri aşındırıcı taneleri sürtünme esnasında yüzeye daha derinden bağlanırlar ve kolaylıkla balata yüzeyinden ayrılmazlar. İnce taneler ise balata yüzeyinden daha kolay ayrılır ve sürtünme filmini oluşturan bileşenlerden biri olurlar [44].

Cho ve arkadaşları ile Lee ve arkadaşları da yapmış oldukları çalışmalarda ince taneli aşındırıcı içeren numunelerin daha iri taneli aşındırıcı içeren numunelerden daha fazla özgül aşınma miktarına sahip olduğunu tespit etmişlerdir [43, 45]. İri taneli aşındırıcı parçacıkları matris malzemesine sıkı sıkıya bağlanırken ince taneler matris malzemesinden

kolayca kopar ve sürtünme ara yüzeyinde balatayı aşındırıcı etki yapar. İri taneli aşındırıcı içeren sürtünme malzemelerinde kayma prosesi iki boyutlu abrazyon şeklinde iken, ince taneli aşındırıcı içeren sürtünme malzemelerinde üç boyutlu abrazyon şeklinde gerçekleşir. Aşındırıcı tanesi sürtünme yüzeyine gömülüyorsa aşınma kazıma mekanizması ile meydana gelir ve iki boyutlu olarak adlandırılır. Aşındırıcı tanesi yüzeye gömülmüyor da ara yüzeyde yuvarlanıyorsa aşınma yuvarlanma mekanizması ile meydana gelir ve üç boyutlu abresif aşınma olarak adlandırılır [58].

Balata malzemelerinin özgül aşınma miktarına aşındırıcı tane boyutunun etkisi sürtünme filminde oluşan temas platoları ile çok yakından ilişkilidir. Bu temas platoları balata yüzeyi ile disk yüzeyinin anlık gerçek temas alanlarının olduğu bölgelerdir. İnce taneli aşındırıcı kullanılan balatalarda, sürtünme yüzeyinde (geçici) süreksiz temas alanları oluşur ve bu alanlar üç boyutlu abresif aşınma mekanizması ile ince tanelerin ara yüzeyde yuvarlanması sonucu ağır hasar görür ve özgül aşınma miktarının artmasına neden olurlar. Diğer taraftan iri taneli aşındırıcı kullanıldığında özgül aşınma miktarı önemli derecede düşmektedir. İri taneler iki boyutlu abresif aşınma mekanizması ile kaymaya neden olur. Sert iri taneler birincil temas platolarını oluşturarak balata ile diskin anlık gerçek temas alanlarını meydana getirirler [43].

Şekil 46-48' de numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 46 a' da A25 numunesinin yüzeyinde ince alüminyum oksit tanelerinden meydana gelmiş düzensiz temas bölgeleri görülmektedir. Bu temas bölgeleri birincil temas platolarını oluşturmaktadır. Şekil 46 b' de ise A63 numunesinin yüzeyinde düzgün ve geniş sürtünme filmi görülmektedir. Bu sürtünme filmi ikincil temas platolarını oluştururken, çıkıntı yapmış iri alüminyum oksit taneleri birincil temas platolarını meydana getirirler. Benzer yüzey özellikleri diğer numunelerde de görülmektedir (Şekil 47 ve 48). Bu temas platolarının oluşumu Cho ve arkadaşlarının çalışmaları sonucu bulunduğu sonuçlarla örtüşmektedir [43].

Sürtünme ara yüzeyinde yuvarlanan ince aşındırıcı taneler yuvarlanma aşınması ile mevcut sürtünme filmine zarar verene kadar anlık gerçek temas alanlarını sürtünme filmleri meydana getirirler. Diğer taraftan iri aşındırıcı taneler balataya sıkı bağlı olduğu için iri taneli aşındırıcı içeren numunelerin yüzeyleri pürüzsüz geniş sürtünme filmi ile kaplıdır. Bu sürtünme filmi şekil 48 c' de ve kısmen de şekil 46 b ve 47 b' de görülmektedir.

Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerinde diskin dönüş yönünde paralel yivler görülmektedir. Sert aşındırıcı parçacıklar dökme demir disk yüzeyini kazıdığı için meydana gelen pürüzlülükler balata yüzeyini çizmektedir. Aşındırıcı tanelerinin Mohs sertlik değeri dökme demir disk malzemesinden yüksek olduğu için, disk yüzeyini aşındırmaktadır. Bu mekanizma Ma ve arkadaşları tarafından açıklanmıştır [42].

Aşınma yüzeylerinden de anlaşıldığı gibi ince taneli aşındırıcı içeren numunelerde birincil temas platolarını sıkışmış aşınma parçacıkları meydana getirmektedir. İri taneli aşındırıcı içeren numunelerde ise birincil temas platolarını bu iri taneler meydana getirirken ikincil temas platolarını da sıkışmış aşınma parçacıkları tarafından oluşturulan sürtünme filmi meydana getirmiştir.

Tablo 9' da aşınmış yüzeylerin EDS analiz sonuçları verilmiştir. Yüzeylerdeki Fe oranı aşındırıcı tane boyutu büyük olan numunelerde daha fazladır. Aşındırıcı tane boyutunun artması dökme demir disk malzemesinden balata yüzeyine transfer olan demir oranını arttırmıştır. İri aşındırıcı taneleri iki boyutlu kazıma şeklinde disk yüzeyini hasara uğratar, ince aşındırıcı taneleri ise üç boyutlu yuvarlanma şeklinde hasara uğratar. İki boyutlu abresif aşınma mekanizması karşı yüzeye daha çok hasar verdiği için disk malzemesinin aşınma miktarını ve dolayısıyla aşınma parçacıkları arasındaki demir oranını arttırmıştır [43,45].

Tablo 10' da görüldüğü gibi aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu artan aşındırıcı tane boyutu ile artmıştır. Sürtünme malzemelerin özgül aşınma miktarları sürtünme filmi ve aşınma parçacıklarının yapısıyla yakından ilişkilidir. Aşınma parçacıklarının yapısı konusunda Kim ve arkadaşları da benzer sonuçlar bulmuştur [55]. Ayrıca sürtünme katsayısı yüksek olan numunelerin aşınma parçacıkları daha büyüktür.

Tablo 11' de aşınma parçacıklarındaki Fe oranı verilmiştir. Aşındırıcı tane boyutu artınca demir oranı artmıştır. Bunun nedeni iri tanelerin karşı yüzeyi daha fazla aşındırmasıdır [43,45].



## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapılan deneylerden elde edilen bulguların değerlendirilmesinden çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Farklı tür ve oranlarda katı yağlayıcı (grafit ve h-BN) ve aşındırıcı ( $Al_2O_3$  ve  $B_4C$ ) içeren fren sürtünme malzemeleri ile ilgili sonuçlar:

1. Numunelerin mekanik özelliklerinde yağlayıcı ve aşındırıcı türü ve oranı ile belirgin bir değişim elde edilmemiştir.
2. Numunelerin sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarları artan yağlayıcı ve azalan aşındırıcı oranları ile artmıştır.
3. Aynı yağlayıcı ve aşındırıcı oranları dikkate alındığında BB grubu numuneleri en iyi aşınma direncini gösterirken, en yüksek sürtünme katsayısı, AB grubu numunelerde bulunmuştur.
4. En iyi feyd yanımı, AB grubu numunelerinde %5-7 h-BN + %5.5-3.5  $Al_2O_3$  ve BB grubu numunelerinde ise %5-7 h-BN + %5.5-3.5  $B_4C$  kompozisyonlarında elde edilmiştir.
5. Aşınma parçacıkları, artan yağlayıcı ve azalan aşındırıcı oranıyla ince yuvarlak şekilden plaka şekline dönüşmüştür.
6. Numune yüzeylerinde ve aşınma parçacıklarındaki Fe oranı artan aşındırıcı ve azalan yağlayıcı oranı ile artmıştır.

Farklı aşındırıcı tane boyutuna sahip fren sürtünme malzemelerine ilişkin sonuçlar:

1. En yüksek sürtünme katsayısı değeri A63 numunesinde ve en iyi aşınma direnci B90 numunesinde elde edilmiştir.
2. Numunelerin sürtünme katsayıları artan aşındırıcı tane boyutu ile artmış ve özgül aşınma miktarları artan aşındırıcı tane boyutu ile azalmıştır.
3. İri taneli aşındırıcı içeren numunelerde sürtünme ve aşınma prosesi iki boyutlu kazıma (two-body) şeklinde gerçekleşirken, ince taneli aşındırıcı içeren

numunelerde sürtünme ve aşınma prosesi üç boyutlu yuvarlanma (three-body) eklinde gerçekleşmiştir.

4. İri taneli aşındırıcı içeren numune yüzeylerinde kararlı ve sürekli bir sürtünme filmi oluşmuştur. İnce taneli aşındırıcı içeren numune yüzeylerinde ise sürekli olmayan sürtünme filmi oluşmuştur.
5. Aşınma parçacıklarının ortalama tane boyutu artan aşındırıcı tane boyutu ile artmıştır.
6. Aınmı yüzeylerde ve aşınma parçacıklarında bulunan Fe oranı artan aşındırıcı tane boyutu ile artmıştır.

## **6. ÖNERİLER**

1. Farklı tip yağlayıcı ve aşındırıcıların balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma özelliklerine olan etkileri incelenebilir.
2. Aşındırıcı ve yağlayıcıların farklı ortamlardaki etkileri incelenebilir.
3. Farklı aşındırıcı ve yağlayıcıların tane büyüklüğü ve şekillerinin karşı yüzey üzerindeki etkileri incelenebilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Bijwe, J., Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos-Fiber Reinforced Friction Materials-A Review, Polymer Composites, 18, 3 (1997) 378-396.
2. Jang, H. ve Kim, S. J., The Effects of Antimony Trisulfide ( $Sb_2S_3$ ) and Zirconium Silicate ( $ZrSiO_4$ ) in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics, Wear, 239 (2000) 229-236.
3. Ertan, R. ve Yavuz, N., Polimer Matriksli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon ve Üretim Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi, Mühendis ve Makina, 47, 553 (2005) 24-30.
4. Satır, İ., Asbestsiz Taşıt Fren Balatalarının Kuru ve Yaş Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
5. <http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/disc-brake1.htm>  
15.03.2015
6. Reinsch, E. W., Sintered Metal Brake Linings For Automotive Applications, Delco-Moraine Division, General Motors Corp Dayton, Chapter 2 (1970) 9-21.
7. Crosa, G. ve Baumvol, I. J. R., Tribology of Polymer Composites Used as Friction, Materials, Advances in Composite Tribology, Composite Materials Series, 8, Klaus Friedrich, Amsterdam, 1993.
8. Dönmez, A. G., Asbest Dışı Elyafarla Üretilen Balata Malzemelerinin Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
9. Anderson, A. E., Friction and Wear of Automotive Brakes, Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM Handbook, 18, New York, 1992.
10. Eggleston, D., Automotive Friction Materials, EURAC Technical Bulletin, 00010433, (2000) 1-22.
11. Lambla, M. ve Vo, V. C., Optimization of Phenolic Resins for Friction Materials, Polymer Composites, 7, 5 (1986) 262-273.
12. Othmer, K., Phenolic Resins, Encyclopedia of Chemical Technology, 15, 2nd Ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 1966.
13. Sugözü, İ., Bor Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretim ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2009.

14. Hao Ko, T. ve Sheng Ma, T., Effect of Post Curing on The Mechanical Properties of Carbonized Phenolic Resins, Polimer Composites, 19, 4 (1998) 456-462.
15. Jang,H., Lee, J.S. ve Fash, J. W., Compositional effects of the brake friction material on creep groan phenomena, Wear, 251 (2001) 1477-1483.
16. Chan, D. ve Stachowiak, G.W., Review of Automotive Brake Friction Materials, School of Mechanical Engineering, University of Western Australia, Australia, 2003.
17. Arkayın, H., CTP Teknolojisi-Cam Elyaf Takviyeli Reçine Sistemleri, Cam Elyaf Sanayii A.Ş. İstanbul, Türkiye, 1984.
18. Katalog, Genel Ürün Kataloğu, İzocam Ticaret ve Sanayi A.Ş., Gebze, Türkiye, 1988.
19. Baker, R., Changes Caused By Legislation Against Asbestos, Powder Metallurgy, 35, 4 (1992) 255-256.
20. Jang, H., Ko, K., Kim, S.J., Basch, R.H. ve Fash, J.W., The Effect of Metal Fibres on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials, Wear, 256, 3-4 (2004) 406-414.
21. Stocks, A. I., Giezendanner, H. ve Van-Der-Hurk, H., Asbestos-Free Clutches and Brakes Reinforced with Kevlar-Aramid Fibers, Int. J. of Vehicle Design, 6, 4-5 (1995) 483-487.
22. Catalog, Basarit, Physical and Chemical Properties, Deutsche Basaltsteinwolle GmbH, Rodetal 40 D-3406 Bovenden, Germany, 1993.
23. Lekili, M., Dolgu Maddesi Kalitesinde Barit, Madencilik Bülteni, 63, 2002.
24. <http://www.vermiculite.com.my/portfolio/brake-friction-material/> 15.03.2015
25. Öztürk, B., Hibrid Kompozit Kavrama Balatası Üretimi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.
26. <http://www.metalurjik.net/seramikler/silisyum-karbur-sic-ve-ozellikleri.html> 15.03.2015
27. Alp, E., Karaçay, E. ve Cabbar, C., Düşük Sıcaklıkta Bor Karbür Üretimi Ve Karakterizasyonu, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 28, 2 (2013) 293-302.
28. Ertan, R., Fren Balata Malzemelerinin Optimizasyonu ve Üretim Parametrelerinin Analizi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2008
29. Yılmaz, F., “Sürtünme ve Aşınma”, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi”, Haziran 1997, İstanbul, 229-247.
30. Eriksson, M. ve Jacobson, S., Tribological Surfaces of Organic Brake Pads, Tribology International, 33 (2000) 817–827.

31. Eriksson, M., Bergman, F. ve Jacobson, S., Surface Characterisation of Brake Pads After Runing Under Silent and Squeling Conditions, Wear, 232 (1999) 163-167.
32. Österle, W., Griepentrog, M. ve Gross, Th., Urban, I., Chemical and Microstructural Changes Induced by Friction and Wear of Brakes, Wear, 251 (2001) 1469–1476.
33. Dönmez, A., G., Asbest Dışı Elyafarla Üretilen Balata Malzemelerinin Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
34. Kim, S. S., Hwang, H. J. ve Shin, M. W., Jang, H., Friction and Vibration of Automotive Brake Pads Containing Different Abrasive Particles, Wear, 271 (2011) 1194-1202.
35. Ozturk, B. Ozturk, S. ve Adiguzel, A.A., Effect of Type and Relative Amount of Solid Lubricants and Abrasives on the Tribological Properties of Brake Friction Materials, Tribology Transactions, 56 (2013) 428-441.
36. Cho, M.H., Ju, J., Kim, S.J. ve Jang, H., Tribological Properties of Solid Lubricants (graphite, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, MoS<sub>2</sub>) for Automotive Brake Friction Materials. Wear, 260 (2006) 855–860.
37. Chen, B., Bi, Q., Yang, J., Xia, Y. ve Hao, J., Tribological Properties of Solid Lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M Friction Composites. Tribol. Int. 41 (2008) 1145–1152.
38. Yi, G., ve Yan, F., Effect of Hexagonal Boron Nitride and Calcined Petroleum Coke on Friction and Wear Behavior of Phenolic Resin-based Friction Composites. Mater. Sci. Eng., A 425 (2006) 330–338.
39. Kim, S.J., Cho, M.H., Cho, K.H. ve Jang, H., Complementary Effects of Solid Lubricants in the Automotive Brake Lining, Tribol. Int., 40 (2007) 15–20.
40. Yi, G. ve Yan, F., Mechanical and Tribological Properties of Phenolic Resin-based Friction Composites Filled With Several Inorganic Fillers, Wear, 262 (2007) 121–129.
41. Jang, H. ve Kim, S.J., The Effects of Antimony Trisulfide (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) and Zirconium Silicate ( ZrSiO<sub>4</sub>) in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics, Wear, 239 (2000) 229-236.
42. Ma, Y., Martynkova, G.S., Valaskova, M., Matejka, V. ve Lu, Y., Effects of ZrSiO<sub>4</sub> in Non-metallic Brake Friction Materials on Friction Performance, Tribol. Int. 41 (2008) 166–174.
43. Cho, K.H., Jang, H., Hong, Y.S., Kim, S.J., Basch, R.H. ve Fasch, J.W., The Size Effect of Zircon Particles on the Friction Characteristics of Brake Lining Materials. Wear, 264 (2008) 291–297.

44. Matejka, V., Lu, Y., Jiao, L., Huang, L., Martynkova, G.S. ve Tomasek, V., Effects of Silicon Carbide Particle Sizes on Friction-Wear Properties of Friction Composites Designed for Car Brake Lining Applications. Tribology International, 43 (2010) 144-151.
45. Lee, E.J., Hwang, H.J., Lee, W.G., Cho, K.H. ve Jang, H., Morphology and Toughness of Abrasive Particles and Their Effects on the Friction and Wear of Friction Materials: a Case Study With Zircon and Quartz, Tribol. Letter, 37 (2010) 637–644.
46. Bijwe, J., Aranganathan, H., Sharma, S., Dureja, N. ve Kumar, R., Nano-abrasives in Friction Materials-Influence on Tribological Properties. Wear, 296 (2012) 693-701.
47. Etemadi, H., Shojaei, A. ve Jahanmard, P.: Effect of Alumina Nanoparticle on the Tribological Performance of Automotive Brake Friction Materials. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33, 2 (2014) 166-178.
48. Tomasek, V., Kratosova, G., Yun, R., Fan, Y. ve Lu, Y., Effects of Alumina in Nonmetallic Brake Friction Performance. J Mater Sci, 44 (2009) 266-273.
49. Kim, S.S., Hwang, H.J., Shin, M.W. ve Jang, H., Friction And Vibration Of Automotive Brake Pads Containing Different Abrasive Particles, Wear, 271 (2011) 1194–1202.
50. Abdul Hamid, M.K. ve Stachowiak, G.W., Effects of External Hard Particles on Brake Friction Characteristics During Hard Braking, Jurnal Teknologi, 2012.
51. <http://www.mta.gov.tr/v2.0/madenler/mineraller> 15.03.2015
52. Bor Esaslı Seramikler (Bor Nitrür), Prof.Dr. Nuran AY Savunma Sanayide Borun Kullanımı Çalıştayı, SSM Ankara, 2011.
53. Chen, B., Bi, Q., Yang, J., Xia, Y., ve Hao, J., Tribological Properties of Solid Lubricants (Graphite, h-BN) for Cu-Based P/M Friction Composites, Tribology International, 41 (2008) 1145–1152.
54. Ozturk, B. ve Ozturk, S., Effects of Resin Type and Fiber Length on the Mechanical and Tribological Properties of Brake Friction Materials, Tribology Letters, 42 (2011) 339–350.
55. Kim, S. J., Cho, M. H., Lim, D. S. ve Jang, H., Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in the Automotive Friction Material, Wear, 251 (2001) 1484–1491.
56. Gurunath, P. V. and Bijwe, J., Friction and Wear Studies on Brake-Pad Materials Based on Newly Developed Resin, Wear, 263 (2007) 1212–1219.
57. Bijwe, J., Nidhi ve Satapathy, B. K., Influence of Amount of Resin on Fade and Recovery Behaviour of Non-Asbestos Organic (NAO) Friction Materials, Transactions of the Indian Institute of Metals, 57 (2004) 335–344.

58. Trezona, R.I., Allsopp D.N. ve Hutchings, I.M., Transitions Between Two-Body And Three-Body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test, Wear, 225-229 (1999) 205-1214.



## ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Tokat'ta doğdu. 2000 yılında Tokat Anadolu Lisesi ve 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2007 yılında askerlik vazifesini tamamladı ve aynı yıl Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü Anatamir Fabrikası Müdürlüğünde Mühendis olarak göreve başladı. 2013 yılında T.C. Devlet Demiryolları İşletmeleri Genel Müdürlüğünde göreve başladı ve halen TCDD İşletmeleri Genel Müdürlüğünde Mühendis olarak görevine devam etmektedir. İngilizce bilmektedir. Yayımlanmış bir adet makalesi vardır.

Öztürk, B. Öztürk, S. ve Adıgüzel, A.A., Effect of Type and Relative Amount of Solid Lubricants and Abrasives on the Tribological Properties of Brake Friction Materials, Tribology Transactions, 56 (2013) 428-441.